

# Istraživanje radiokontaminacije grada Sarajeva i njegove okolice s obzirom na radionuklide

KUI – 8/2009  
Prispjelo 2. travnja 2008.  
Prihvaćeno 5. veljače 2009.

J. Huremović<sup>a</sup>, M. Horvat<sup>b</sup>, E. Ruždić<sup>a</sup> i R. Jaćimović<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Sveučilište u Sarajevu, Prirodno-matematički fakultet, Odsjek za Kemiju, Zmaja od Bosne 33–35, 71000 Sarajevo, Bosna i Hercegovina

<sup>b</sup> Institut Jožef Štefan, Odsek za znanosti o okolju, Jamova 39, 1001 Ljubljana, Slovenija

U posljednje vrijeme postoje razne kalkulacije o streljivu koje koristi osiromašeni uranij, a koje je upotrebljavano tijekom rata u Bosni i Hercegovini (1992.–1995.). Pored toga, područje Bosne i Hercegovine bilo je pod izravnim utjecajem globalnih disperzijskih procesa u razdoblju mjeseca svibnja 1986. godine, kao posljedica emisije iz Nuklearne elektrane "Lenin" u Černobilu. Cilj istraživanja bio je odrediti specifičnu radioaktivnost: <sup>238</sup>U, <sup>226</sup>Ra, <sup>210</sup>Pb, <sup>232</sup>Th, <sup>40</sup>K i <sup>137</sup>Cs u površinski uzetim uzorcima tla u gradu Sarajevu i njegovoj okolici. Uzorci tla uzeti su s devet lokaliteta u gradu Sarajevu i njegovoj okolici. Upotrebljavan je detektor Ge HP spojen na Ortec MCA Gamma Vision 32 Software kao i instrumentna neutronska aktivacijska tehnika (INAA).

Rezultati analize uspoređeni su s raspoloživim podacima za grad Sarajevo (1986., 1987., 1988. godina) i Sloveniju. Ti podaci se odnose na razdoblje odmah nakon katastrofe u Černobilu. Gotovo kod svih analiziranih radionuklida imamo neznatno višu specifičnu radioaktivnost u odnosu na podatke iz 1986., 1987. i 1988. godine za grad Sarajevo. Naši rezultati ne odstupaju od vrijednosti dobivenih u Sloveniji, osim u slučaju <sup>137</sup>Cs na lokalitetu Vraca, gdje je znatno viša specifična radioaktivnost i iznosi  $\alpha = 460 \pm 20 \text{ Bq kg}^{-1}$ .

Ključne riječi: *Radionuklidi, radioaktivna kontaminacija, grad Sarajevo*

## Uvod

Otkriće radioaktivnosti i brzi razvitak nuklearnih tehnologija obilježili su 20. stoljeće. Izgledalo je da će čovječanstvo, ovladavanjem novim nuklearnim izvorom energije, ući u sretnu budućnost. Međutim, tragični događaji tijekom Drugog svjetskog rata, obilježeni uporabom atomskih bombi, jasno su označili da je nastupilo doba neizvjesnosti, jer je u ljudskoj ruci koncentrirana moć neograničene razorne snage.<sup>1</sup>

Sva živa bića na Zemlji izložena su djelovanju radioaktivnih zračenja. Kao tri glavna izvora prirodnog zračenja navode se: svemirsko zračenje, terestričko i zračenje radioaktivnih elemenata koji se nalaze u živom svijetu. Od najveće su važnosti radioaktivni nizovi <sup>232</sup>Th ( $t_{1/2} = 1,4 \cdot 10^{10}$  godina), <sup>238</sup>U ( $t_{1/2} = 4,5 \cdot 10^9$  godina) i <sup>235</sup>U ( $t_{1/2} = 7,1 \cdot 10^8$  godina). Njihovim raspadom nastaju tri serije nestabilnih jezgri, koje se raspadaju uzastopnim beta- i alfa-emisijama do stabilnih izotopa olova <sup>206</sup>Pb, <sup>207</sup>Pb i <sup>208</sup>Pb. Pored navedenih, u prirodne radioaktivne elemente ubraja se i <sup>40</sup>K. Iako mu je aktivnost niska, zbog obilnosti kalija u prirodi on ima značajnu ulogu u termičkom režimu Zemlje.<sup>2</sup>

Uranij u Zemljinoj kori postoji kao smjesa tri izotopa (masenih brojeva 238, 235 i 234). <sup>238</sup>U je prisutan u iznosu  $w = 99,28 \%$  a <sup>235</sup>U u iznosu od 0,72 %. Izotopi <sup>238</sup>U i <sup>235</sup>U nastali su u davnoj prošlosti, a prisutni su i danas, jer se raspadaju veoma sporo. Treći izotop, <sup>234</sup>U, nastaje radioaktivnim raspadom izotopa <sup>238</sup>U.

<sup>226</sup>Ra postoji u svim stijenama i tlu u različitim količinama. Maseni udjel <sup>232</sup>Th u Zemljinoj kori je oko  $w = 0,02 \text{ g kg}^{-1}$ . Ta količina torija će proizvesti u jednoj sekundi 490 alfa- i 330 beta-čestica.

Radioaktivnost potječe iz prirodnih (prirodna radioaktivnost) kao i iz umjetnih izvora (umjetna radioaktivnost). Prirodna radioaktivnost je uzrokovana prisutnošću radionuklida u prirodi kao što su <sup>226</sup>Ra, <sup>222</sup>Rn, <sup>238</sup>U, <sup>230</sup>Th, <sup>210</sup>Po, <sup>210</sup>Pb, <sup>40</sup>K i drugi. Umjetna radioaktivnost uzrokovana je radionuklidima formiranim u reakcijama nuklearne fizije i fuzije.<sup>3</sup>

Znanstveni Odbor UN-a za učinke atomske radioaktivnosti (UNSCEAR) procjenjuje da izlaganje prirodnim izvorima zračenja doprinosi više od 80 % doze zračenja kojom su izloženi ljudi (isključujući izlaganje u medicinske svrhe). Postoji vrlo mali doprinos zbog proizvodnje nuklearne energije i testiranja nuklearnog naoružanja. Naravno, postoje velike lokalne razlike u izlaganju zračenju koje ovise o nizu čimbenika, kao što su količina i tip radionuklida u tlu, količina unesena u tijelo preko zraka, vode i tla, hrane itd.<sup>4</sup>

Zbog različitih tipova zračenja imamo i različite biološke učinke na ljudski organizam. Različiti organi i tkiva pokazuju različitu osjetljivost prema zračenju.

Rizik od zračenja po ljudsko zdravlje je funkcija ukupne doze koja se prima od svih izvora. Radionuklidi uneseni u tijelo doprinose izloženosti zračenju koja se može produžiti na mjesece ili godine.<sup>5,6</sup>

S obzirom na rastući problem kao i povećan interes za kontrolu okoliša, rad je koncipiran tako da se analizom uzoraka tla na odabranim lokacijama u Sarajevu i okolici napravi pregled masenih udjela radionuklida ( $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  i  $^{137}\text{Cs}$ ) i u slučaju odstupanja napravi procjena uzroka takovog stanja. Analize su rađene na Odjelu za okoliš Instituta Jožef Štefan u Ljubljani, Slovenija.

## Eksperimentalni dio

### Uzorkovanje

Uzorci tla su uzeti s devet lokaliteta u gradu Sarajevu i njegovoj okolici: Blekin potok, Kobilja glava, Bentbaša, Vraca, Prirodno-matematički fakultet (PMF), Azići, Hrasnica, Butmir i Blažuj. Mjesta uzorkovanja su prikazana na slici 1. Uzorci tla (neobrađeno tlo) uzimani su s površine tla (0–5 cm). Uzorci su pohranjivani u polietilenske vrećice.

Vrijeme uzorkovanja je rujn 2000. godine.

### Postupak

#### $\gamma$ -spektrometrija

$^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  i  $^{137}\text{Cs}$  određivani su  $\gamma$ -spektrometrijom izravno iz svježih uzoraka, koji su stavljeni u plastične kontejnere od 100 mL, uporabom detektora Ge HP spojenog na Ortec MCA Gamma Vision 32 Software. Aktivni volumen detektora bio je 120 mL, a rezolucija 1.8 keV na 1332 liniji  $^{60}\text{Co}$ . Za kalibraciju su upotrebljeni:  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{51}\text{Cr}$ ,  $^{109}\text{Cd}$ ,  $^{139}\text{Ce}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{113}\text{Sn}$ ,  $^{85}\text{Sr}$ ,  $^{65}\text{Zn}$ ,  $^{152}\text{Eu}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ . Ti radionuklidi imaju dobro definirane karakteristike i pokrivaju širok spektar gama-energije.

Uzorci tla sušeni su na temperaturi od 40 °C, prosijani kroz sito promjera 2 mm, da se odstrane krupni dijelovi (kamenje i sl.) Uzorci tla su zatim samljeveni, izvagani u mjernim posudicama koje se hermetički zatvaraju.

Nakon homogenizacije uzorci su ostavljeni da odstoje najmanje tri tjedna da bi se postigla ravnoteža  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{222}\text{Rn}$  i njihovih kratkoživućih potomaka ( $^{214}\text{Pb}$  i  $^{214}\text{Bi}$ ) – približno 20 dana. Aktivnost  $^{210}\text{Pb}$  je mjerena na 46,5 keV,  $^{238}\text{U}$  na 63,7 keV,  $^{226}\text{Ra}$  na 295,2, 352,0 i 609,4 keV,  $^{232}\text{Th}$  na 238,6, 583,1 i 911,1 keV,  $^{40}\text{K}$  na 1460,8 keV i  $^{137}\text{Cs}$  na 661,6 keV. Budući da izotop  $^{210}\text{Pb}$  ima nisku energiju i mali intenzitet gama-zrake, rezultati za  $^{210}\text{Pb}$  korigirani su standardnim certificiranim referentnim materijalom: SOIL-IAEA-327. Za korekciju na gustoću referentnog materijala pri toj energiji upotrijebljen je najbliži izvor:  $^{241}\text{Am}$  (59,5 keV) i  $^{137}\text{Cs}$  (32,0 keV). Vrijeme mjerenja svakog uzorka je bilo približno 100 000 s. Tipična nesigurnost za mjerenje uzoraka bila je 1 – 6 %. Spektar je obrađen programom Hypermet – PC.

Rezultati su prikazani kao cjelokupna nesigurnost mjerenja, a ne samo statistika. Nesigurnost mjerenja je izražena kao kombinirana standardna nesigurnost ( $k = 1$  ili  $k = 2$ ).

#### Instrumentna neutronska aktivacijska analiza (INAA)

Alikvot uzorka ( $m = 150\text{--}200$  mg) se stavi u supračisti plastični kontejner (SRP – sistem) i ozračuje 20 h u postrojenju TRIGA Mark II Reaktora, Ljubljana, Slovenija (termalna neutronska gustoća protoka:  $\varphi = 1,0 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ,  $\alpha = -0,01$ ).

Žica od legure Al – 0,1 % Au, promjera 1,0 mm, i 125 mm Zr-folija bile su zračene zajedno s uzorcima radi usporedbe i kontrole gustoće protoka. Za kratkoživuće radionuklide vrijeme ozračenja bilo je oko 1 minute u pneumatskom prijenosnom sustavu (termalna neutronska brzina protoka:  $\varphi = 3,5 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ,  $\alpha = -0,02$ ).

Primijenjena je metoda temeljena na  $k_0$ . Ozračeni uzorci su zatim prebačeni u čiste polietilenske bočice na kalibrirani koaksijalni detektor HP Ge spojen na multikanalni analizator “Canberra” serije 90.

Ozračeni kratkoživući radionuklidi mjereni su 2 puta: 5 min nakon 2 min hlađenja i 30 min nakon 3 h hlađenja. Ozračeni radionuklidi koji imaju duži vijek života mjereni su 3 puta: nakon 2, 8 i 39 d hlađenja. Za procjenu površine vrha primijenjen je program SAMPO 90.<sup>7</sup> Za izračun detekcijske djelotvornosti korišten je program<sup>8</sup> SOLCOI, a za izračunavanje udjela elemenata program KAYZERO, koji je PC verzija programa<sup>9</sup> SINGCOM instaliran na računalu VAX 8650.

#### Analička kontrola kvaliteta

Ispitni laboratorij na Odjelu za okoliš Instituta Jožef Štefan u Ljubljani, redovito, obično minimalno 1–2 puta godišnje, sudjeluje u međulaboratorijskim ispitivanjima i interkalibracijama.

Za validaciju metode, odnosno rezultata upotrijebljen je certificirani referentni materijal – SOIL-IAEA-327.



Slika 1 – Satelitski snimak grada Sarajeva s naznačenim mjestima uzorkovanja  
Fig. 1 – The satellite footage of the City of Sarajevo with marked sampling locations

**Rezultati i diskusija**

U posljednje vrijeme kalkulira se o streljivu koje koristi osiromašeni uranij i posljedicama djelovanja tog streljiva na kontaminaciju područja Bosne i Hercegovine i šire. Područje Bosne i Hercegovine bilo je kontaminirano radioaktivnom tvari putem globalnih disperzijskih procesa u razdoblju mjeseca svibnja 1986. godine, kao izravna posljedica emisije iz Nuklearne elektrane "Lenin" u Černobilu. Meteorološke prilike u tom razdoblju su uzrokovale nerav-

nomjernu radiokontaminaciju tla te su pojedine regije u znatnoj mjeri, a neke samo neznatno, kontaminirane radioaktivnim materijalom. U prvom vremenu nakon depozicije radioaktivnih materija, kratkoživući radionuklidi  $^{132}\text{Te}/^{132}\text{I}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{140}\text{Ba}/^{140}\text{La}$  i  $^{134}\text{Cs}$  znatno pridonose ukupnoj dozi vanjskog ozračenja, a nekoliko sljedećih mjeseci toj dozi pridonose  $^{103}\text{Ru}$  i  $^{106}\text{Ru}$  da bi nakon toga značajan doprinos ozračenju davali  $^{137}\text{Cs}$  i  $^{134}\text{Cs}$ . Taj doprinos će trajati nekoliko godina ( $^{134}\text{Cs}$ ), odnosno nekoliko desetljeća ( $^{137}\text{Cs}$ ). Rezultati o radioaktivnosti uzoraka tla dati su u tablici 1.

T a b l i c a 1 – *Specifična radioaktivnost uzoraka tla uzetih iz okoline Sarajeva (Bq kg<sup>-1</sup>)*T a b l e 1 – *Specific radioactivity of soil samples taken from Sarajevo's environment (Bq kg<sup>-1</sup>)*

Radionuklid Radionuclides Uzorak Sample	$^{210}\text{Pb}$ $\alpha/\text{Bq kg}^{-1}$	$^{238}\text{U}$ $\alpha/\text{Bq kg}^{-1}$	$^{226}\text{Ra}$ $\alpha/\text{Bq kg}^{-1}$	$^{232}\text{Th}$ $\alpha/\text{Bq kg}^{-1}$	$^{137}\text{Cs}$ $\alpha/\text{Bq kg}^{-1}$	$^{40}\text{K}$ $\alpha/\text{Bq kg}^{-1}$
Butmir	62 ± 3	52 ± 4	50 ± 4	59 ± 3	67 ± 3	550 ± 35
Azići	43 ± 2	37 ± 4	34 ± 2	41 ± 3	71 ± 3	490 ± 30
Blažuj	65 ± 3	43 ± 3	49 ± 2	57 ± 3	31 ± 1	810 ± 50
Blekin potok	61 ± 3	43 ± 4	30 ± 2	40 ± 2	173 ± 7	410 ± 30
Kobilja glava	39 ± 2	35 ± 3	37 ± 3	40 ± 2	59 ± 2	550 ± 30
Bentbaša	54 ± 7	22 ± 2	32 ± 6	27 ± 3	147 ± 5	360 ± 20
Vraca	81 ± 13	38 ± 3	53 ± 10	41 ± 4	460 ± 20	520 ± 30
Hrasnica	97 ± 3	50 ± 3	57 ± 11	81 ± 8	113 ± 4	420 ± 30
PMF	70 ± 9	31 ± 2	56 ± 11	38 ± 4	193 ± 7	490 ± 30

Za usporedbu naših podataka koristili smo raspoloživu literaturu za grad Sarajevo<sup>5</sup> (1986., 1987., 1988. godina). Analize su rađene nakon katastrofe u Černobilu i podacima iz Slovenije<sup>10</sup>. Ovi podaci su dani u tablicama 2, 3 i 4.

T a b l i c a 2 – *Razine aktivnosti radionuklida u tlu utvrđeni "in situ" mjerenjem na području Sarajeva u 1986. godini (Saračević, 1990.)*T a b l e 2 – *Levels of radionuclides activity in soil, established "in situ" by measuring in Sarajevo area in 1986 (Saračević, 1990)*

	$^{137}\text{Cs}$ $\alpha/\text{Bq kg}^{-1}$	$^{134}\text{Cs}$ $\alpha/\text{Bq kg}^{-1}$	$^{40}\text{K}$ $\alpha/\text{Bq kg}^{-1}$	$^{238}\text{U}$ $\alpha/\text{Bq kg}^{-1}$	$^{232}\text{Th}$ $\alpha/\text{Bq kg}^{-1}$	$^{226}\text{Ra}$ $\alpha/\text{Bq kg}^{-1}$
Stari grad	160,93	74,53	336,92	34,78	37,44	42,56
Centar	225,60	95,20	277,50	29,87	26,90	41,95
Novo Sarajevo	256,10	102,13	175,47	24,50	31,82	36,69
Novi grad	116,13	46,77	286,52	14,01	18,87	16,99
Ilidža	143,73	54,67	357,67	35,84	30,73	30,25
Vogošća	88,67	33,73	281,42	27,60	13,81	20,66

T a b l i c a 3 – *Razine specifične aktivnosti radionuklida u tlu utvrđeni "in situ" mjerenjem na području Sarajeva u 1987. godini<sup>5</sup>*T a b l e 3 – *Levels of radionuclides activity in soil, established "in situ" by measuring in the Sarajevo area in 1987<sup>5</sup>*

	$^{137}\text{Cs}$ $\alpha/\text{Bq kg}^{-1}$	$^{134}\text{Cs}$ $\alpha/\text{Bq kg}^{-1}$	$^{40}\text{K}$ $\alpha/\text{Bq kg}^{-1}$	$^{238}\text{U}$ $\alpha/\text{Bq kg}^{-1}$	$^{232}\text{Th}$ $\alpha/\text{Bq kg}^{-1}$	$^{226}\text{Ra}$ $\alpha/\text{Bq kg}^{-1}$
Stari grad	102,13	41,60	423,74	27,54	39,42	37,52
Centar	180,27	68,93	464,53	20,57	32,45	31,25
Novo Sarajevo	233,87	72,27	224,54	22,33	25,34	34,23
Novi grad	82,93	35,07	300,22	26,53	30,16	26,20
Ilidža	112,80	42,93	420,22	32,15	33,43	35,68
Vogošća	70,13	24,80	432,18	29,35	25,18	22,54

T a b l i c a 4 – Razine aktivnosti radionuklida u tlu utvrđeni "in situ" mjerenjem na području Sarajeva u 1988. godini<sup>5</sup>T a b l e 4 – Levels of radionuclides activity in soil, established "in situ" by measuring in the Sarajevo area in 1988<sup>5</sup>

	<sup>137</sup> Cs $\alpha/\text{Bq kg}^{-1}$	<sup>134</sup> Cs $\alpha/\text{Bq kg}^{-1}$	<sup>40</sup> K $\alpha/\text{Bq kg}^{-1}$	<sup>238</sup> U $\alpha/\text{Bq kg}^{-1}$	<sup>232</sup> Th $\alpha/\text{Bq kg}^{-1}$	<sup>226</sup> Ra $\alpha/\text{Bq kg}^{-1}$
Stari grad	71,33	27,73	411,33	30,12	31,61	40,12
Centar	136,27	47,20	400,27	24,67	30,66	33,45
Novo Sarajevo	165,73	49,07	243,28	25,11	30,18	31,46
Novi grad	60,00	26,67	325,45	22,74	27,50	30,18
Ilidža	84,93	37,73	436,47	20,18	32,28	30,14
Vogošća	45,73	14,93	369,52	22,62	30,20	27,32

NAPOMENA: Ilidži pripadaju: Azići, Butmir, Blažuj i Hrasnica; Starom gradu pripada: Bentbaša; Centru pripada: Blekin potok; Novom Sarajevu pripadaju: PMF, Vraca; Vogošći pripada: Kobilja glava.

Kao primjer, navodimo i vrijednosti dobivene u uzorcima tla iz različitih dijelova Slovenije.<sup>10</sup>

Radionuklid Radionuclides	$\alpha/\text{Bq kg}^{-1}$	Napomena Note
<sup>210</sup> Pb	50 – 120	
<sup>238</sup> U	40 – 100	
<sup>226</sup> Ra	40 – 100	površinski dio zemlje surface soil layer
<sup>232</sup> Th	40 – 80	
<sup>40</sup> K	300 – 800	10 – 25 cm dubine 10 – 25 cm depth
<sup>137</sup> Cs	100 – 200	
<sup>137</sup> Cs	20 – 100	

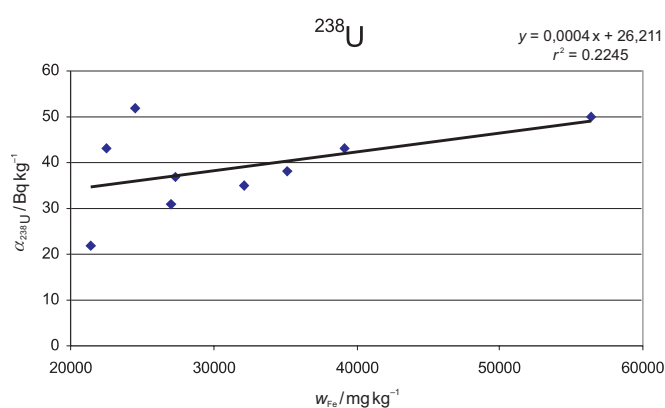
Kako bismo bili sigurni odgovaraju li proračunate vrijednosti za prirodne radionuklide uobičajenim vrijednostima radionuklida u tlu, tj. jesu li ovisne o geološkom sastavu tla ili su eventualno posljedica antropogenog unosa, napravljene su normalizacije u odnosu na Fe.

Normalizacija je statističko oruđe koje pomaže u procjeni porijekla pojedinih elemenata u tlu. Vrijednosti radioaktivnosti radionuklida u tlu su normalizirane u odnosu na maseni udjel željeza, kao makroelementa prisutnog u tlu. U tablici 5. dani su rezultati analize ukupnog udjela željeza u tlu – metodom instrumentalne neutron aktivacijske tehnike.

Slike 2., 3., 4., 5. i 6. prikazuju normalizacije specifične radioaktivnosti pojedinih radionuklida u odnosu na maseni udjel Fe u uzorcima tla.

T a b l i c a 5 – Rezultati analize ukupnog sadržaja željeza ( $\pm$  mjerna nesigurnost) u površinski (0–5 cm) uzetim uzorcima tla metodom instrumentalne neutron aktivacijske tehnikeT a b l e 5 – Results obtained in analysis of total iron content ( $\pm$  measurement inaccuracy) in samples of soil surface (0–5 cm) using the Instrumental Neutron Activation Analysis technique

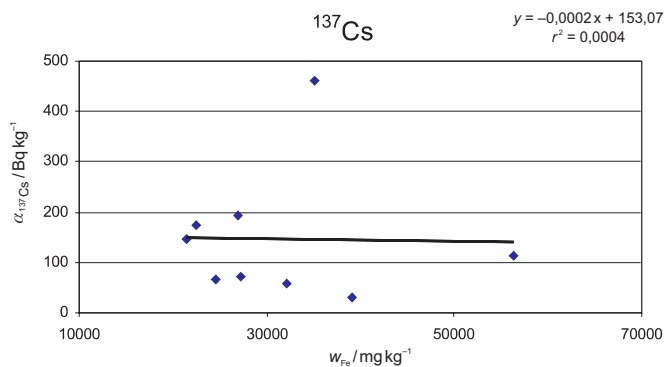
Uzorak Sample $w/\text{mg kg}^{-1}$	Blažuj $w/\text{mg kg}^{-1}$	Vraca $w/\text{mg kg}^{-1}$	Hrasnica $w/\text{mg kg}^{-1}$	PMF $w/\text{mg kg}^{-1}$	Bentbaša $w/\text{mg kg}^{-1}$	Butmir $w/\text{mg kg}^{-1}$	Azići $w/\text{mg kg}^{-1}$	Kobilja glava $w/\text{mg kg}^{-1}$	Blekin potok $w/\text{mg kg}^{-1}$
Fe	39 100 $\pm 1130$	35 100 $\pm 1080$	56 400 $\pm 1800$	27 000 $\pm 1050$	21 400 $\pm 990$	24 500 $\pm 1000$	27 300 $\pm 760$	32 100 $\pm 920$	22 500 $\pm 800$

S l i k a 2 – Normalizacija specifične radioaktivnosti <sup>238</sup>U prema masenom udjelu Fe u uzorcima tlaF i g. 2 – Specific radioactivity normalization <sup>238</sup>U towards Fe mass fraction in soil samples

U slučaju <sup>238</sup>U imamo odstupanja na lokacijama Butmira i Blekinog potoka. Otpadni produkt iz procesa obogaćivanja prirodnog uranija je <sup>235</sup>U, nazvan *osiromašeni uranij*. Nuklearno zakonodavno povjerenstvo (NRC) definira osiromašeni uranij kao uranij u kome je sadržaj izotopa <sup>235</sup>U manji od 0,711 %, najčešće od 0,3–0,2 %.<sup>1</sup>

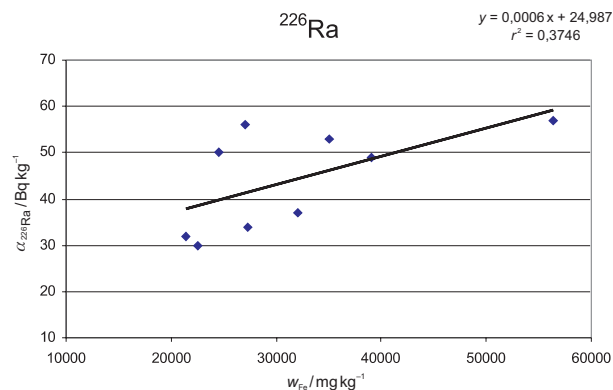
Zbog straha da je u našim uzorcima prisutan osiromašeni uranij, načinjena je  $\gamma$ -spektrometrijska analiza. Analiza uzoraka tla na svim lokacijama pokazala je da je <sup>238</sup>U u proporciji s <sup>235</sup>U. Kako je već spomenuto, uranij u Zemljinoj kori postoji uglavnom kao smjesa dvaju izotopa (masenih brojeva 235 i 238). <sup>238</sup>U je prisutan u iznosu 99,28 %, a <sup>235</sup>U u iznosu od 0,72 %.





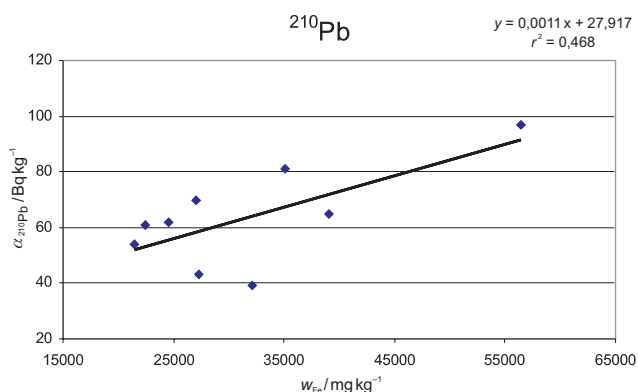
Slika 3 – Normalizacija specifične radioaktivnosti <sup>137</sup>Cs prema masenom udjelu Fe u uzorcima tla

Fig. 3 – Specific radioactivity normalization <sup>137</sup>Cs towards Fe mass fraction in soil samples



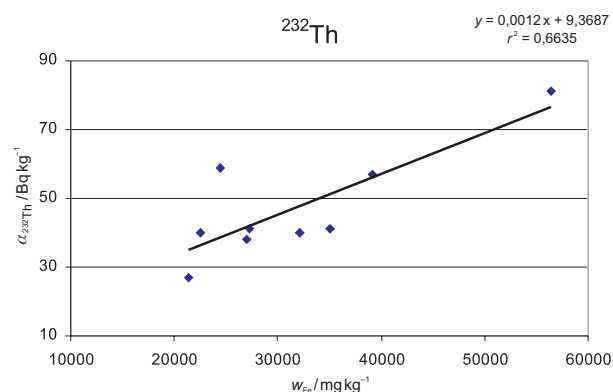
Slika 5 – Normalizacija specifične radioaktivnosti <sup>226</sup>Ra prema masenom udjelu Fe u uzorcima tla

Fig. 5 – Specific radioactivity normalization <sup>226</sup>Ra towards Fe mass fraction in soil samples



Slika 4 – Normalizacija specifične radioaktivnosti <sup>210</sup>Pb prema masenom udjelu Fe u uzorcima tla

Fig. 4 – Specific radioactivity normalization <sup>210</sup>Pb towards Fe mass fraction in soil samples



Slika 6 – Normalizacija specifične radioaktivnosti <sup>232</sup>Th prema masenom udjelu Fe u uzorcima tla

Fig. 6 – Specific radioactivity normalization <sup>232</sup>Th towards Fe mass fraction in soil samples

Izotopi <sup>134</sup>Cs i <sup>137</sup>Cs, iako potječu od istog elementa, imaju različito vrijeme poluraspada (2,2 a za <sup>134</sup>Cs i 28 a za <sup>137</sup>Cs).<sup>1</sup>

S obzirom da je <sup>137</sup>Cs fizički radionuklid, jedini način stvaranja i unosa u okoliš je antropogenim putem. *r*<sup>2</sup> faktor normalizacije <sup>137</sup>Cs prema udjelu Fe u uzorcima tla veoma je nizak i iznosi  $w = 4 \cdot 10^{-4}$ . Ako usporedimo rezultate za <sup>137</sup>Cs u tablicama 1., 2., 3. i 4., vidimo da je na svim lokalitetima, izuzev lokaliteta Vraca, specifična radioaktivnost ovog radionuklida niža u odnosu na specifičnu radioaktivnost <sup>137</sup>Cs dobivene analizom uzoraka tla ranijih godina. Na lokalitetu Vraca specifična koncentracija <sup>137</sup>Cs je znatno viša i iznosi  $\alpha = 460 \pm 20$  Bq kg<sup>-1</sup>.

Prisutnost <sup>137</sup>Cs, u našim uzorcima, najvjerojatnije je posljedica černobilske katastrofe.

### Zaključci

Određivana je radioaktivnost <sup>210</sup>Pb, <sup>238</sup>U, <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th, <sup>137</sup>Cs i <sup>40</sup>K. Na osnovi prikupljenih podataka može se uočiti sljedeće:

– Kod gotovo svih radionuklida postoji porast specifične radioaktivnosti u odnosu na podatke iz 1986., 1987. i 1988. godine za grad Sarajevo.

– Naši rezultati ne odstupaju od vrijednosti dobivenih u Sloveniji, osim u slučaju <sup>137</sup>Cs na lokalitetu Vraca, gdje je znatno viša specifična radioaktivnost i iznosi  $\alpha = 460 \pm 20$  Bq kg<sup>-1</sup>.

– Povećan udjel <sup>137</sup>Cs vjerojatno je posljedica katastrofe Nuklearne elektrane u Černobilu.

– Analiza uzoraka tla na svim lokacijama pokazala je da je <sup>238</sup>U u proporciji s <sup>235</sup>U.

### ZAHVALA

Zahvaljujemo se osoblju Odjela za okolje, Instituta Jožef Štefan u Ljubljani, prof. dr. Lejli Saračević s Veterinarskog fakulteta u Sarajevu na kolegijalnoj pomoći. Također se zahvaljujemo recenzentima na sugestijama i vrlo vrijednim komentarima.

### Literatura:

### References:

1. E. Zovko, Z. Pujić, Radioaktivnost u prirodi: Uran i osiromašeni uran, Izdavač: Univerzitet u Sarajevu, (2003), prvo izdanje.
2. J. Tolgyessy, Chemistry and biology of water, air and soil, Studies in Environmental Science, Elsevier, **53** (1993).

- |  |                       |   |
|--|-----------------------|---|
| 3. D. W. Loweland, D. J. Morrissey, G. T. Seaborg, <i>Modern Nuclear Chemistry</i> , John Wiley and Sons publication, (2006).  | UNSCEAR               | – Znanstveni komitet UN-a za efekte atomske radioaktivnosti   |
| 4. WHO, <i>Guidelines for drinking-water quality</i> , Vol. 2, Geneva, (1996), second edition.   |                       | – United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation  |
| 5. L. Saračević, <i>Istraživanje uticaja akutne radioaktivne kontaminacije tla na efektivnu ekvivalentnu dozu i radijacioni rizik stanovništva regije Sarajeva</i> , doktorska disertacija, Veterinarski fakultet, Univerzitet u Sarajevu, (1990). | CRM                   | – certificirani referentni material<br>– Certified Reference Materials  |
| 6. J. Huremović, <i>Istraživanje zagađenja okoline Sarajeva obzirom na živu, metale u tragovima i radionuklide</i> , magistarski rad, Prirodno-matematički fakultet, Univerzitet u Sarajevu, (2002).   | NRC                   | – Nuklearna zakonomjerna komisija<br>– Nuclear Regulatory Commission  |
| 7. Sampo 90 V3. 20, <i>Users's Manual</i> , Legion, Helsinki, and Canner Industries, Meriden, CT, USA, (1993).   | <i>m</i>              | – masa, mg<br>– mass, mg  |
| 8. L. Moens, J. Donder, <i>Nuclear Instrumental Methods</i> <b>18</b> (1981) 451   | <i>N</i>              | – broj neutrona<br>– neutron number   |
| 9. L. Xilei, F. Corte, <i>Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry</i> <b>81</b> (1984) 333.   | <i>r</i> <sup>2</sup> | – faktor normalizacije<br>– normalization factor  |
| 10. Z. Jeran, <i>Epifatski lišajji – biološki indikatorji onesnaženosti zraka s kovinami in radionuklidi</i> , doktorska disertacija, Biotehniška fakulteta, Univerza v Ljubljani, (1995).   | <i>S</i>              | – presjek, cm <sup>2</sup><br>– across section, cm <sup>2</sup>   |
|  | <i>t</i>              | – vrijeme, s, min, h<br>– time, s, min, h   |
|  | <i>w</i>              | – maseni udjel, %<br>– mass fraction, %   |
|  | $\alpha$              | – specifična radioaktivnost, Bq kg <sup>-1</sup><br>– specific radioactivity, Bq kg <sup>-1</sup>               |
|  | $\varphi$             | – gustoća protoka, cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup><br>– density of flow rate, cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> |
- Popis kratica i simbola**  
**List of abbreviations and symbols**
- INAA – instrumentalna neutron aktivaciona tehnika  
– Instrumental Neutron Activation Analysis

## SUMMARY

### Analysis of the Radiopollution of the City of Sarajevo and its Surrounding Area with Regard to Radionuclides

J. Huremović<sup>a</sup>, M. Horvat<sup>b</sup>, E. Ruždić<sup>a</sup> and R. Jačimović<sup>b</sup>

In recent years, great attention has been focused on the research of problems related to the environment and processes occurring within it. The accident that occurred at Nuclear Power Plant in Chernobyl (1986) unquestionably warned that global pollution with radioactive substances on a continent scale may be expected. The past twenty years have been marked with the utilization of metal uranium – a depleted isotope of uranium-235 for various purposes. Today, depleted uranium has found its use in modern armies and it is used as efficient ammunition against armored military systems.

There are estimates about the usage of ammunition with depleted uranium deployed in Bosnia and Herzegovina during the war (1992–1995). The region of Bosnia and Herzegovina was exposed to the direct influence of the global dispersion processes that had occurred in May 1986 as a consequence of emissions originating from Nuclear Power Plant "Lenin" in Chernobyl. In this work the radionuclides fraction analysis (<sup>238</sup>U, <sup>226</sup>Ra, <sup>210</sup>Pb, <sup>232</sup>Th, <sup>40</sup>K i <sup>137</sup>Cs) of surface samples (0–5 cm) originating from the City of Sarajevo and its surroundings has been presented. The soil samples were taken from nine locations in the city and the surrounding area: Blekin potok, Kobilja glava, Bentbaša, Vraca, Prirodno-matematički fakultet (PMF), Azići, Hrasnica, Butmir, and Blažuj. The analyses were performed at the Department for Environment of Jožef Štefan Institute in Ljubljana, Slovenia. Ge HP detector connected to Ortec MCA Gamma Vision 32 Software was used in addition to the Instrumental Neutron Activation Technique (INAA).

The results of the analysis were compared with data available for the City of Sarajevo (years 1986, 1987 and 1988) and Slovenia. Analyses were made after Chernobyl catastrophe. Almost all of radionuclides analysed have shown to have a slightly higher specific radioactivity when compared to the data obtained in 1986, 1987 and 1989 for the City of Sarajevo. Our results are in accordance with the values obtained in Slovenia except in the case of <sup>137</sup>Cs at location Vraca, where a significantly higher concentration has been observed and reaching  $\alpha = 460 \pm 20$  Bq kg<sup>-1</sup>.

<sup>a</sup> University of Sarajevo, Faculty of Science, Department of Chemistry, Zmaja od Bosne 33–35, 71000 Sarajevo, Bosnia and Herzegovina

<sup>b</sup> Jožef Štefan Institute, Department of Environmental Science, Jamova 39, 1001 Ljubljana, Slovenia

Received April 2, 2008  
Accepted February 5, 2009