

Aleksandra Papludis, Ana Simonović, Slađana Alagić<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Univerzitet u Beogradu, Tehnički fakultet u Boru, Bor, Srbija

Pregledni rad

ISSN 0351-9465, E-ISSN 2466-2585

<https://doi.org/10.5937/zasmat2202165P>



Zastita Materijala 63 (2)

165 - 176 (2022)

## Sadržaj policikličnih aromatičnih ugljovodonika u zemljištu formiranih tokom spaljivanja e-otpada na mestima njegovog neadekvatnog odlaganja i reciklaže

### IZVOD

*Elektronski i električni (e-) otpad predstavlja veliki ekološki problem širom sveta. Nepravilno rukovanje, odlaganje i reciklaža e-otpada dovode do negativnog uticaja na životnu sredinu, posebno na zagađenje zemljišta. Poznato je da organske zagađujuće materije kao što su policiklični aromatični ugljovodonici (PAU), u životnoj sredini nastaju na više načina, pa tako i pirolitičkim procesima prilikom spaljivanja e-otpada. Imajući u vidu da su ove organske materije veoma toksične, čak i u izuzetno niskim koncentracijama, glavni cilj ovog rada bio je da se prikaže literaturni pregled PAU u zemljištu u blizini mesta za odlaganje i recikliranje e-otpada, koja nisu uređena po sanitarnim propisima.*

**Ključne reči:** PAU, e-otpad, zagađenje, zemljište, reciklaža, spaljivanje

### 1. UVOD

Veliki problem u mnogim zemljama predstavlja zagađenje zemljišta, koje nastaje kao posledica nekontrolisanog odlaganja i spaljivanja komunalnog, industrijskog, poljoprivrednog i konačno, elektonskog i električnog, (e-)otpada [1,2]. U najširem smislu, termin e-otpada se odavno koristi za svu odbačenu električnu i elektronsku opremu (WEEE, eng. waste electrical and electronic equipment); međutim, u užem smislu, ovaj termin opisuje odbačene elektronske uređaje kao što su: kompjuteri, televizori i mobilni telefoni i ne obuhvata električne uređaje kao što su, frižideri, šporeti, mašine za pranje veša i drugi manji kućni uređaji [3].

Elektronski i električni otpad predstavlja problem od velike važnosti, sa kojim se posebno suočavaju zemlje kao što su Kina i zemlje u razvoju poput Indije, Nigerije i Gane, u koje e-otpada dospeva često i nelegalno iz razvijenih zemalja Amerike, Japana i Evropske Unije (EU) radi reciklaže. Tehnike koje se koriste u aktivnostima vezanim za reciklažu e-otpada u zemljama u razvoju najčešće se odvijaju na veoma primitivan način.

\*Autor za korespondenciju: Slađana Alagić

E-mail: [salagic@tfbor.bg.ac.rs](mailto:salagic@tfbor.bg.ac.rs)

Rad primljen: 16. 12. 2021.

Rad korigovan: 17. 01. 2022.

Rad prihvaćen: 19. 01. 2022.

Rad je dostupan na sajtu: [www.idk.org.rs/casopis](http://www.idk.org.rs/casopis)

U tom procesu, zastareli elektronski uređaji se prvo rastavljaju na komponente, a dragocene sekundarne sirovine se dalje koriste za izradu novih proizvoda, dok se ostaci nepotrebne plastike odlažu na deponijama koje nisu uređene po sanitarnim propisima, ili se spaljuju. Prilikom spaljivanja nepotrebnih delova e-otpada, kao što su ostaci plastike, žice, starih guma, ostaci goriva i maziva, ili tokom topljenja štampanih ploča prevođenjem preko užarenog uglja (kako bi se oslobodili dragoceni čipovi), u životnu sredinu se oslobađaju brojne štetne materije uključujući i policiklične aromatične ugljovodonike (PAU) [4-8].

### 2. POREKLO PAU U ŽIVOTNOJ SREDINI I NJIHOVE OSOBINE

Policiklični aromatični ugljovodonici (PAU, ili eng. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAHs) nastaju kao produkti nepotpunog sagorevanja fosilnih goriva - nafte, uglja, prirodnog gasa, drveta, čvrstog otpada itd. i pripadaju grupi organskih zagađujućih materija, koje imaju osobinu dugotrajnog opstanka u životnoj sredini (tzv. perzistentni organski polutanti, POPs).

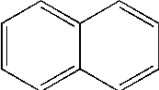
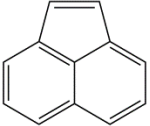
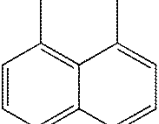
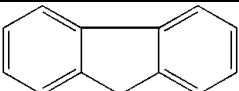
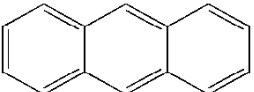
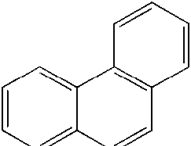
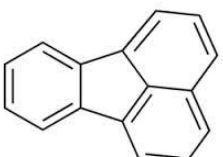
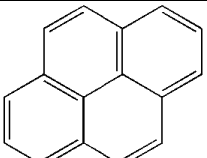
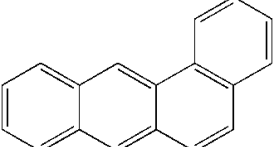
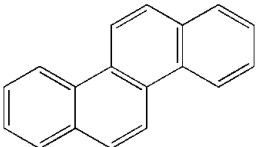
Postoji preko 100 jedinjenja koja pripadaju ovoj grupi, ali najčešće se proučava njih oko 40. Američka agencija za zaštitu životne sredine, (United States Environmental Protection Agency, USEPA),

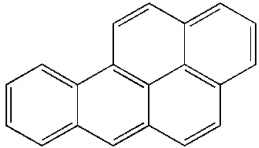
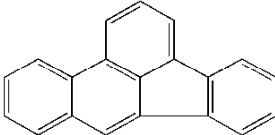
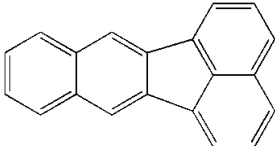
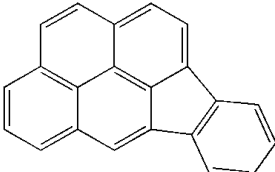
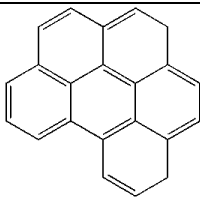
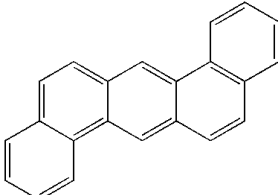
odavno je postavila 16 PAU jedinjenja na svoju listu prioriternih polutanata koji se obavezno prate u industrijskim emisijama (u literaturi poznati kao ukupni PAU, ili PAHs, ΣPAHs); 7 PAU ova agencija

smatra potencijalno kancerogenim, a to su: benzo(a)antracen, benzo(a)piren, benzo(b)fluoranten, benzo(k)fluoranten, dibenzo(a,h)antracen, hrizen i indeno(1,2,3-c,d)piren (Tabela 1.) [9-17].

Tabela 1. Fizičko-hemijske osobine i hemijske strukture 16 prioriternih PAU\*

Table 1. Physico-chemical properties and chemical structures of 16 priority PAHs

Jedinjenje/ Skraćenica	Hemijska struktura	Molekulska masa	Rastvorljivost ( $\mu\text{g/L}$ )	Napon pare <sup>a</sup> (mm Hg)
Naftalen <sup>b</sup> / Nap		128,19	31,69	0,087
Acenaftilen / Ace		152,20	3,930	$2,9 \cdot 10^{-2}$
Acenaften / Acp		154,21	1,930	$4,5 \cdot 10^{-3}$
Fluoren / Flr		166,20	1,680–1,980	$3,2 \cdot 10^{-4}$
Antracen <sup>b</sup> / Ant		178,20	76	$1,7 \cdot 10^{-5}$
Fenantren <sup>b</sup> / Phe		178,20	1,200	$6,8 \cdot 10^{-4}$
Fluoranten <sup>b</sup> / Flt		202,26	200–260	$5,0 \cdot 10^{-6}$
Piren / Pyr		202,30	77	$2,5 \cdot 10^{-6}$
Benzo(a)antracen <sup>b,c</sup> / BaA		228,29	10	$2,2 \cdot 10^{-8}$
Hrizen <sup>b,c</sup> / CHR		228,30	2,8	$6,3 \cdot 10^{-7}$

Benzo(a)piren <sup>b,c</sup> / BaP		252,30	2,3	$5,6 \cdot 10^{-9}$
Benzo(b)fluoranten <sup>c</sup> / BbF		252,30	1,2	$5,0 \cdot 10^{-7}$
Benzo(k)fluoranten <sup>b,c</sup> / BkF		252,30	0,76	$9,6 \cdot 10^{-11}$
Indeno(1,2,3-cd)piren <sup>b,c</sup> / IcP		276,30	62	$1 \cdot 10^{-11} - 1 \cdot 10^{-6}$
Benzo(g,h,i)perilen <sup>b</sup> / BgP		276,34	0,26	$1 \cdot 10^{-10}$
Dibenzo(a,h)antracen <sup>c</sup> / DhA		278,35	0,5	$1 \cdot 10^{-10}$

\* – adaptirano iz Alagić i sar. [9]; Simon i Sobieraj [14]

<sup>a</sup> – potencijal volatilizacije jedinjenja

<sup>b</sup> – 10 PAU iz pojedinih zakonskih propisa

<sup>c</sup> – mogući kancerogeni za ljude (klasifikacija od strane USEPA)

Poreklo PAU u životnoj sredini povezuje se kako sa prirodnim, tako i sa antropogenim izvorima zagađenja [18].

Značajni prirodni izvori ovih opasnih zagađujućih materija su: vulkanske erupcije i veliki šumski požari. Najčešći izvori PAU u svakodnevnim situacijama u čovekovom okruženju su duvanski dim, pečenje i dimljenje prehrambenih namirnica i slično. Preovlađujući izvor u gradovima tokom zime je zagrevanje stanova, ali konstantno i gradski saobraćaj. U antropogene izvore zagađenja spadaju i procesi vezani za industriju, aktivnosti u poljoprivredi i gradski otpad (nastaju tokom nepotpunog sagorevanja, pirolizom, u industrijskim procesima, topljenjem metala, u proizvodnji guma, sagorevanjem u automobilskim motorima, itd.). To su jedinjenja veoma složene strukture, koja u svom molekulu sadrže dva, ili više kondenzovanih benzenovih prstenova. Nekoliko njih se proizvodi i

komercijalno, uključujući: Nap, Acp, Flr, Ant, Phe, Flt i Pyr [6,9,14,16,17,19-22].

Na ponašanje PAU u životnoj sredini značajno utiču njihove fizičko-hemijske osobine koje su prikazane u Tabeli 1. [9,12,14,22,23].

### 2.1 Izvori i ponašanje PAU u zemljištu

Policiklični aromatični ugljovodonici u zemljište dospevaju na različite načine. U značajne izvore spadaju: atmosferska depozicija, izduvni gasovi automobila, kanalizacioni muljevi, industrijske otpadne vode, izlivanje goriva i nafte, spaljivanje različitih vrsta otpada itd. [12,23].

U zavisnosti od izvora, PAU se mogu podeliti na: pirogene, petrogene i biološke [22]. PAU male, tj. niske molekulske mase (tzv. niskomolekularni PAU, NM PAU) nazivaju se petrogeni i nastaju prilikom zrenja sirove nafte, koje traje dugi niz godina, ili mogu biti posledica izlivanja nafte i

goriva u mora, okeane i zemljište. Pirogeni PAU nastaju tokom nepotpunog sagorevanja uglja, nafte, komunalnog i industrijskog otpada, kao i taloženjem iz vazduha [1,2,22,24]. Generalno je prihvaćeno da su NM PAU predominantno petrogenog porekla, dok su PAU sa velikom, tj. visokom molekulskom masom (tzv. Visokomolekularni PAU, VM PAU) pre svega poreklom iz pirogenih izvora.

Količina PAU nastalih kroz pirogene i petrogene procese znatno je veća u odnosu na količinu PAU nastalih kroz biološke procese. Nastajanje PAU biološkim putem, sintezom u nekim biljkama ili bakterijama, kao i degradacijom organske supstance, retko se sreće [23].

Mehanizmi ponašanja PAU u zemljištu još uvek nisu dovoljno razjašnjeni, pa se pretpostavlja da na ponašanje svakog pojedinačnog PAU-jedinjenja veliki uticaj imaju njihove fizičko-hemijske osobine: molekulska masa, rastvorljivost i napon pare [12,25,26].

PAU u životnoj sredini, pa tako i u zemljištu, podležu procesima isparavanja, apsorpcije, luženja, erozije, degradacije (biološke i hemijske) i sekvestracije u kojoj su uključeni procesi adsorpcije i difuzije [12,19,23,25,26].

Karakteristike zemljišta (tekstura zemljišta, sadržaj zemljišne organske materije, ZOM i gline) imaju veliki uticaj na ponašanje PAU u njemu [12,25]. Sorpcija i procesi sekvestracije imaju važnu ulogu u akumulaciji PAU u zemljištu. PAU se u zemljištu snažno vezuju za ZOM i minerale gline. Takođe, veličina čestica zemljišta i pH vrednost utiču na proces sorpcije PAU u zemljištu [12]. PAU se vezuju za čestice veličine do 50  $\mu\text{m}$  koje sadrži ZOM [23] i to pre svega hidrofobnim interakcijama sa aromatičnim fragmentima huminskih i fulvinskih kiselina [22,23]. Oni uobičajeno prodiru u dubinu zemljišta i tako zagađuju podzemne vode. Apsorbuju ih vodeni organizmi i biljke i prenose putem lanaca ishrane, te se mogu akumulirati u telu čoveka na duži vremenski period, što dalje može dovesti do negativnog uticaja na ljudsko zdravlje (kao što je disfunkcija reproduktivnih organa i genetski poremećaji) [13].

Policiklični aromatični ugljovodonici prisutni u zemljištu podležu različitim procesima transformacije. Procesu fotooksidacije u zemljištu podležu samo PAU koji se nalaze u površinskom sloju, koji je karakterističan po NM PAU, tako da ovaj proces ne doprinosi degradaciji svih PAU u velikoj meri. Na povišenim temperaturama mogu biti uklonjeni isparavanjem, nakon čega dospevaju u vazduh. Kako se molekulska masa PAU povećava, povećavaju se hidrofobnost i lipofilnost, rastvorljivost u

vodi se smanjuje, napon pare se smanjuje i jedinjenja se sporije raspadaju [26], tako da se VM PAU izrazito jako vezuju za ZOM [12,23].

Nisko molekularni PAU maju veći napon pare, pa se smatra da su relativno dobro isparljivi, dok VM PAU isparavaju sporije; NM PAU se brže degradiraju u zemljištu i brže isparavaju od onih sa VM. Nisko molekularni PAU su manje stabilni, manje lipofilni i lakše rastvorni u vodi, dok su VM PAU stabilniji i štetniji po ljudsko zdravlje od NM PAU [23]. Visoko molekularni PAU su otporniji u životnoj sredini zbog slabe isparljivosti, otpornosti na luženje i rekalcitrantskih osobina, tj. osobina jačeg vezivanja za čestice zemljišta sa protokom vremena [26]. PAU male molekulske mase kao što su: Nap, Ace, Acp, Flr, Ant i Phe u zemljištu mogu biti brzo degradirani od strane bakterija i gljivica, dok VM PAU opstaju u životnoj sredini duži vremenski period, zbog velike otpornosti na hemijsku i mikrobnu razgradnju [13].

### 3. UTICAJ RECIKLAŽE ELEKTRONSKOG OTPADA NA ZAGAĐENJE ZEMLJIŠTA PAU

Stvaranje otpada je funkcija koja je usko povezana sa ljudskim aktivnostima [27]. Njegovo neadekvatno odlaganje, rukovanje i reciklaža mogu negativno uticati na životnu sredinu i ljudsko zdravlje [13,28], tako da upravljanje otpadom predstavlja veliki problem u mnogim zemljama sveta [27].

Različite vrste otpada nastaju svakodnevno, kako iz domaćinstava tako i iz industrije i zahtevaju pravilno upravljanje na globalnom nivou. Jedna od glavnih kategorija čvrstog otpada, koja poslednjih godina predstavlja ekološki problem širom sveta je upravo e-otpad.

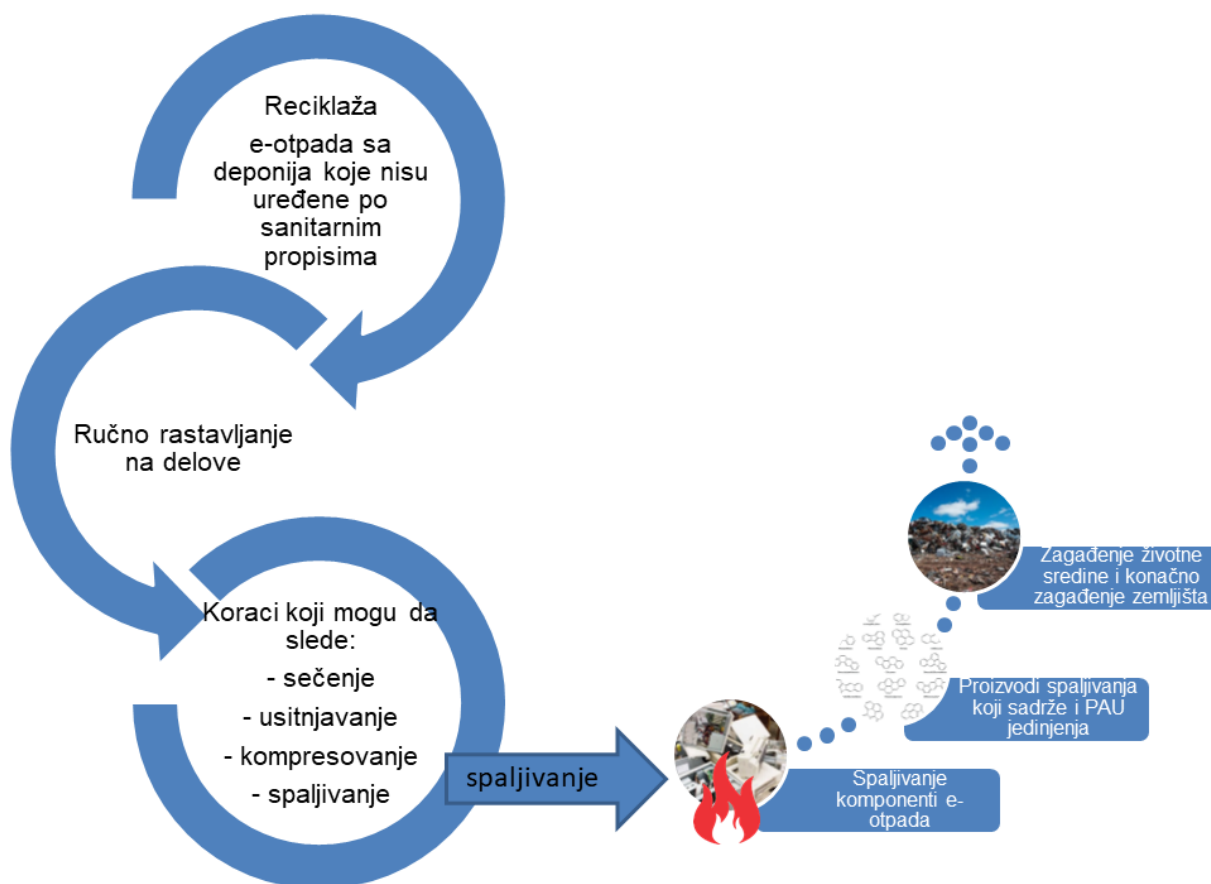
Električni i elektronski uređaji su sastavni deo modernog načina života, njihova potrošnja neprestano raste širom sveta, tako da su tehnološki napredak i razvoj elektronske industrije doveli do stvaranja velikih količina e-otpada [5,7,8,29].

E-otpad iz Amerike nelegalno se izvozi u zemlje kao što su Kina, Indija, Nigerija, Pakistan, Vijetnam i Gana [1,4-7,30], gde se tehnike koje se koriste u aktivnostima vezanim za reciklažu e-otpada odvijaju na neadekvatan i nepravilan način [5].

Stvaranje e-otpada na globalnom novou procenjuje se na 20-50 miliona tona godišnje, a samo 15-20% ovog otpada odlazi na reciklažu [31]. Oko 75% ovog otpada se ne može iskoristiti, ili reciklirati pa na taj način nastaju ogromne količine otpada koje se odlažu na deponije, koje nisu uređene po sanitarnim propisima (tzv. neuređene deponije) [1], ili se spaljuju na otvorenom, pri čemu se oslobađaju štetne materije, koje dospevaju u zemljište, podzemne vode i atmosferu [32].

Na slici 1. prikazana je šema procesa reciklaže e-otpada sa deponija koje nisu uređene po sanitarnim propisima, kao i toksične supstance koje

se oslobađaju prilikom spaljivanja nepotrebnih ostataka e-otpada utičući na zagađenje životne sredine i zemljišta [33].



Slika 1. Šematski prikaz reciklaže e-otpada

Figure 1. Schematic presentation of e-waste recycling

Reciklažu e-otpada čine sledeći procesi: ručno rastavljanje na komponente, obrada materijala (mehanički tretman) i njihovo ponovno korišćenje i prerada. Ručno rastavljanje neophodno je za sve vrste e-otpada, kako bi se razdvojile i razvrstale različite vrste otpadnih materija. Pod obradom e-materijala spada: sortiranje, drobljenje, usitnjavanje i spaljivanje (na otvorenom) delova e-otpada kao što su: štampane ploče, kablovi, plastika, žice, stare gume, ostaci goriva i maziva itd. [32].

Prilikom spaljivanja otpada u životnu sredinu oslobađaju se toksične materije iz grupe perzistentnih organskih zagađujućih materija, kao što su polihlorovani dibenzo-dioksini (PCDD) i dibenzofurani (PCDF), polihlorovani bifenili (PCBs), ali i PAU [1,5,7,8,16,29,32,34].

Prilikom ručnog rastavljanja e-otpada u atmosferu se oslobađaju čestice prašine bogate zagađujućim materijama. PAU se dalje talože u životnoj sredini bilo suvom ili vlažnom depozicijom u blizini

izvora zagađenja, ili se mogu prenositi na velike udaljenosti u zavisnosti od njihove molekulske mase. Na ovaj način PAU mogu zagaditi vazduh, vodu i zemljište, mogu se izlučiti u podzemnim vodama, te tako mogu da dopru do svih živih bića [33].

Jasno je da termički i neadekvatni metalurški procesi tretmana e-otpada mogu dovesti do stvaranja izuzetno opasnih nus-produkata, kao što su PAU, formiranih pre svega tokom spaljivanja plastičnih masa (PVC) koje su sastavni deo e-otpada. Sudbina i ponašanje pepela i dima koji nastaju prilikom spaljivanja e-otpada su isti kao i prilikom aktivnosti koje su vezane za fazu razdvajanja e-otpada [33].

Kada jednom dospeju u životnu sredinu zbog njihovih isparljivih i hidrofobnih osobina PAU imaju tendenciju akumulacije u svim medijumima životne sredine, koji su bogati organskim materijama i u kojima se zadržavaju duži vremenski period zbog svoje perzistentnosti [33,34].

Može se sa sigurnošću pretpostaviti da je za povećan sadržaj PAU u zemljištu deponije (i oko nje) odgovorno nepravilno odlaganje otpada na onim deponijama koje nisu uređene po sanitarnim propisima, kao i spaljivanje na otvorenom bez filtriranja otpadnih gasova, koji se dalje prenose atmosferskim transportom [13,35]. PAU se često talože u blizini izvora zagađenja, dok se NM PAU (Nap i ostali) mogu transportovati i na velike udaljenosti, tako da reciklažne aktivnosti koje se ne obavljaju po zakonskim propisima doprinose

kontaminaciji životne sredine i značajno utiču na ljudsko zdravlje [33].

### 3.1. Primeri zagađenja zemljišta PAU poreklom od recikliranja e-otpada

Većina zemalja u razvoju nema zakonom propisane MDK za PAU u zemljištu tako da su u Tabeli 2. date dostupne propisane vrednosti za ove PAU. U Tabeli 3. izvršena je klasifikacija stepena zagađenosti zemljišta u zavisnosti od koncentracije  $\Sigma 16$  PAU.

Tabela 2. Maksimalno dozvoljene koncentracije (MDK) PAU u zemljištu po zakonodavstvu Srbije, Holandije, Švedske, Švajcarske i Poljske

Table 2. Maximum allowed concentrations of PAHs in the soil according to the legislation of Serbia, Netherlands, Sweden, Switzerland and Poland

Propisi	$\Sigma 16$ PAU	$\Sigma 10$ PAU	$\Sigma 7$ PAU
MDK, Srbija		1 mg/kg <sup>[36]</sup>	
MDK, Holandija	50 $\mu\text{g}/\text{kg}$ <sup>[35]</sup>	<1000 $\mu\text{g}/\text{kg}$ <sup>[1,4,8,27]</sup>	
MDK, Švedska	200 $\mu\text{g}/\text{kg}$ <sup>[8]</sup>		300 $\mu\text{g}/\text{kg}$ <sup>[4,8,35]</sup>
MDK, Švajcarska	200 $\mu\text{g}/\text{kg}$ <sup>[5]</sup>		
MDK, Poljska	<1000 $\mu\text{g}/\text{kg}$ <sup>[1,27]</sup>		

Tabela 3. Klasifikacija stepena zagađenosti zemljišta u zavisnosti od koncentracije  $\Sigma 16$  PAU<sup>a</sup>

Table 3. Classification of the level of soil pollution depending on the concentration of  $\Sigma 16$  PAHs<sup>a</sup>

Stepen zagađenosti zemljišta	Koncentracije PAU
Nezagađeno	<200 $\mu\text{g}/\text{kg}$
Umereno zagađeno	200–600 $\mu\text{g}/\text{kg}$
Zagađeno	600–1000 $\mu\text{g}/\text{kg}$
Veoma zagađeno	>1000 $\mu\text{g}/\text{kg}$

<sup>a</sup> - [7,21,27,29,35,37-39]

U delu rada koji sledi dat je literaturni pregled dobijenih rezultata ispitivanih područja na prostorima Kine, Nigerije i Gane, koji su poznati po reciklaži e-otpada, a koja se ne odvija po zakonskim propisima prihvaćenim od većine zemalja. Konačno, analizirani primeri sistematizovani su pregledno u Tabeli 4.

Yu i sar. [29], Leung i sar. [4] i Gao i sar. [34] ispitivali su koncentracije 16 prioriternih USEPA PAU (Tabela 1.) u zemljištu na području grada Guiyu, (provincija Guangdong, u jugo-istočnom delu Kine), poznatom po više značajnih prerađivačkih centara e-otpada.

Godine 2003. Leung i sar. [4] ispitivali su koncentracije PAU u zemljištu na deponiji plastike, gde je dominantno bilo prisustvo PAU sa 4 prstena i deponiji valjaka od štampača, gde je bilo dominantno prisustvo PAU sa 2 i 3 prstena (Nap je bio najzastupljeniji, dok su najveće koncentracije

bile za Phe), PAU sa 5 i 6 prstenova nisu bili detektovani. U zemljištu deponije plastike detektovano je svih 16 prioriternih PAU po USEPA-i, osim Ace. Guma, materijal od kojeg se izrađuju valjci za uvlačenje papira u štampače bazirana je na rastvaraču poreklom iz nafte, što se može povezati sa preovladavanjem NM PAU u zemljištu ove deponije. Najtoksičnije zemljište bilo je na deponiji, gde se spaljuje plastični otpad: kancerogeni PAU zauzimali su 43%, dok je BaP zauzimao 5,3% od ukupne koncentracije PAU. Iako sami autori nisu izveli poređenje sa kriterijumima za zagađenje zemljišta, koncentracije na obe ispitivane deponije ukazuju na umerenu kontaminaciju zemljišta PAU (Tabela 3).

U istraživanjima Yu i sar. iz 2004. godine [29], ukupne koncentracije 16 prioriternih PAU u zemljištu šire ispitivanog područja u okolini grada Guiyu (uključujući i ruralne lokacije) kretale su se u opsegu od 44,8–3206  $\mu\text{g}/\text{kg}$  suve mase, sa prosečnom koncentracijom od 582  $\mu\text{g}/\text{kg}$ . Najviše detektovane vrednosti koncentracija PAU bile su u uzorku zemljišta oko samog izvora zagađenja i na lokaciji udaljenosti od 500 m (>1000  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ), dok su najniže vrednosti koncentracija bile u zemljištu ruralnih lokacija (<200  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ). Prema klasifikaciji zagađenja (Tabela 3), autori su zaključili da zemljište na ispitivanoj teritoriji spada u umereno kontaminirano. Međutim, zemljište na lokaciji gde se otpad spaljuje na otvorenom klasifikovano je kao veoma zagađeno, jer je ovde, detektovana koncentracija iznosila 2065  $\mu\text{g}/\text{kg}$ . Dominantni PAU u zemljištu bili su: Nap, Phe i Flt, koji uglavnom

nastaju usled nepotpunog sagorevanja e-otpada (npr. izolovane žice, materijal od PVC-a), ali i sagorevanjem uglja i iz izduvnih gasova automobila.

Nakon više godina, 2012, Gao i sar. [34] ispitivali su sadržaj PAU u zemljištu na području istog grada, ali posmatrajući do tada neispitanu deponiju i spalionicu e-otpada (na otvorenom), kao i uticaj saobraćaja. Koncentracije za  $\Sigma 16$  PAU kretale su se u opsegu od 294,9–10083,86  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ; prosečna koncentracija iznosila je 1239  $\mu\text{g}/\text{kg}$ , a najveće koncentracije PAU bile su detektovane na deponiji e-otpada (5962  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ) i na lokaciji spaljiva-

nja otpada (10084  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ). U ovom istraživanju najveće koncentracije bile su detektovane za PAU sa više od 3 prstena, koja su jedna od najstabilnijih jedinjenja iz ove grupe polutanata. Prema klasifikaciji zagađenja (Tabela 3), koju ovi autori nisu razmatrali u svom radu, očigledno je da je zemljište na ispitivanom području bilo veoma kontaminirano. Pored e-otpada, koji predstavlja jedan od dominantnih izvora zagađenja zemljišta PAU, ovi autori tvrde da veliki uticaj na PAU zagađenje ima i saobraćaj, koji u blizini prometnih saobraćajnica doprinosi PAU u vazduhu od 60-90%, što se svakako negativno odražava i na zagađenje zemljišta.

Tabela 4. Sadržaj PAU ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ ) u ispitivanim zemljištima

Table 4. The content of PAHs ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ ) in the examined soils

PAU	Opseg koncentracija	Prosečna koncentracija	Lokacija	Literatura
$\Sigma 16$ PAU	/	428*	Guiyu, Guangdong, Kina	[4]
$\Sigma 16$ PAU	/	593**		
$\Sigma 7$ PAU	10,8-185***	/		
$\Sigma 16$ PAU	44,8-3206	582	Guiyu, Guangdong, Kina	[29]
$\Sigma 16$ PAU	294,9-10083,86	1239	Guiyu, Guangdong, Kina	[34]
$\Sigma 10$ PAU	19,01-4241,55	/		
$\Sigma 7$ PAU	2,11-1046,56	/		
$\Sigma 16$ PAU	127-10600	1230	Longtang, Guangdong, Kina	[39]
$\Sigma 7$ PAU	30,4-1800	/	Longtang, Guangdong, Kina	[7]
$\Sigma 16$ PAU	24,8-4291,4	514,4		
$\Sigma 16$ PAU	262,6-3420,2	1118,2	Zeguo, Taizhou, Zhejiang, Kina	[5]
$\Sigma 7$ PAU	70,5-1254,1	282,8	Taizhou, Zhejiang, Kina	[21]
$\Sigma 16$ PAU	125-4737	854		
$\Sigma 16$ PAU	/	32,61-1053,69	Xinqiao, Taizhou, Zhejiang, Kina	[37]
$\Sigma 16$ PAU (2011)	190,8-1921,5	590,4	Venling, Taizhou, Zhejiang, Kina	[35]
$\Sigma 7$ PAU (2011)	80,4-1134,0	324,8		
$\Sigma 16$ PAU (2016)	58,5-1332,2	407,3		
$\Sigma 7$ PAU (2016)	27,6-1009,8	262,8		
$\Sigma 16$ PAU	0-15 cm	1756-2224	Lagos i Ibadan, Nigerija	[1]
	15-30 cm	1664-2152		
$\Sigma 16$ PAU	117,6·10 <sup>3</sup> -201,7·10 <sup>3</sup>	/	Aba, Nigerija	[6]
$\Sigma 16$ PAU	Kingtom	130-5200	Akra, Gana	[30]
	Agbogbloshe	850-10000		

\* – prosečna koncentracija na deponiji plastike za 16 PAU

\*\* – prosečna koncentracija na deponiji valjaka za štampače za 16 PAU

\*\*\* – opseg koncentracija na deponiji plastike za 7 kancerogenih PAU

Godine 2007. Wang i sar. [39] ispitivali su sadržaj PAU u zemljištu i biljkama, blizu deponije e-otpada u gradu Longtang, na severu iste

pokrajine, Guangdong. Ukupne koncentracije  $\Sigma 16$  PAU kretale su se u opsegu od 127 do 10600 ng/g, sa prosečnom koncentracijom od 1230 ng/g.

Ukupne koncentracije 7 kancerogenih PAU u zemljištu kretale su se u opsegu od 30,4–1800 ng/g. Najveće koncentracije PAU bile su u zemljištu na lokaciji spaljivanja otpada na otvorenom, dok su najniže koncentracije PAU bile u napuštenom poljoprivrednom zemljištu. Analizom zemljišta na području Guangdong-a zaključeno je da je za kontaminaciju zemljišta PAU odgovoran atmosferski transport kojim se ove zagađujuće materije prenose od izvora zagađenja do udaljenih lokacija. Prema kriterijumima zagađenja zemljišta urađenih od strane autora veći, deo ispitivanog zemljišta može se smatrati veoma zagađenim.

Godine 2011. Huang i sar. [7] su ispitivali sadržaj PAU u zemljištu Longtang-a (Guangdong, Kina), ali na jednom širem području. Koncentracije  $\Sigma 16$  PAU kretale su se u opsegu od 24,8 ng/g na ruralnim lokacijama (poljoprivredno zemljište) do 4291,4 ng/g na lokaciji na kojoj se spaljuje e-otpada. Zemljište u Longtang-u bilo je jako-zagađeno zbog nepropisnog odlaganja e-otpada. Na osnovu klasifikacije zagađenosti zemljišta prikazanoj u Tabeli 3. i detektovanih koncentracija na ispitivanim lokacijama može se zaključiti da je zemljište oko reciklažne radionice bilo kontaminirano, a zemljište na lokaciji gde se spaljuje otpad veoma kontaminirano. Nap, Phe, Flt, Pyr, CHR i BbF bili su najzastupljeniji u uzorcima zemljišta na ispitivanim lokacijama i zauzimali su 75% od ukupne koncentracije PAU.

Upoređujući prosečne koncentracije za  $\Sigma 16$  PAU na različitim deponijama i reciklažnim mestima područja grada Guiyu (provincija Guangdong, Kina), može se doći do zaključka da je 2012. godine, u istraživanjima Gao-a i sar. [34] ova vrednost bila najveća (1239  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ), kao i da je spadala u opseg veoma zagađenog zemljišta, dok su prosečne koncentracije na dve deponije u istraživanjima Leung-a i sar. [4] iz 2003. godine bile značajno niže (428  $\mu\text{g}/\text{kg}$  i 593  $\mu\text{g}/\text{kg}$ , respektivno), a tkđ. i iz 2004. godine, u istraživanju Yu-a i sar. [29] (582  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ), tj. sve one spadale su u opseg koji ukazuje na umereno zagađeno zemljište.

Što se tiče grada Longtang, iz provincije Guangdong (Kina) i istraživanja Wang-a i sar. [39] iz 2007. godine, prosečna koncentracija za  $\Sigma 16$  PAU na različitim deponijama iznosila je 1230  $\mu\text{g}/\text{kg}$  i spadala je u opseg veoma zagađenog zemljišta, dok je u istraživanjima Huang-a i sar. [7] iz 2011. godine ova koncentracija bila duplo manja (514,4  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ) i spadala je u opseg umereno zagađenog zemljišta.

Na području pokrajine Taizhou-a, u Kini, veći broj istraživača ispitivao je sadržaj PAU u zemljištu oko deponija i mesta za reciklažu e-otpada. 2008. godine, Tang i sar. [5] su ispitivali koncentracije PAU u poljoprivrednom zemljištu oko grada Zeguo, na lokaciji gde se spaljuju i odlažu velike količine e-

otpada. Ukupne koncentracije 16 prioriternih PAU kretale su se u opsegu od 262,6–3420,2  $\mu\text{g}/\text{kg}$ , sa prosečnom vrednošću od 1118,2  $\mu\text{g}/\text{kg}$ , dok su se koncentracije sedam kancerogenih PAU kretale u opsegu od 70,5–1254,1  $\mu\text{g}/\text{kg}$ , sa prosečnom koncentracijom od 282,8  $\mu\text{g}/\text{kg}$ . Najveće koncentracije PAU bile su u poljoprivrednom zemljištu blizu odlagališta e-otpada i reciklažne radionice, pri čemu nije bilo značajne razlike između NM i VM PAU na ispitivanim lokacijama. Najveće koncentracije bile su zabeležene za Phe, Ant, Flt i Pyr, dok su najmanje koncentracije bile detektovane za: Ace, Acp, IcP, DhA i BgP. Iako ni ovi autori nisu napravili poređenje sa kriterijumima za zagađenje zemljišta, jasno je da detektovane koncentracije u ovom radu ukazuju na visoko zagađenje, pri čemu se poljoprivredno zemljište na području grada Zeguo-a ne preporučuje za gajenje poljoprivrednih kultura.

Iste godine, Liao i sar. [21] ispitivali su sadržaj PAU u površinskom sloju zemljišta na većem području Taizhou (Kina). Koncentracije za  $\Sigma 16$  PAU kretale su se od 125 ng/g do 4737 ng/g, sa prosečnom koncentracijom koja je iznosila 854 ng/g. Prema klasifikaciji zagađenja zemljišta, prikazanoj u Tabeli 3., a koja je data od strane autora, zemljište je na 19 od 29 ispitivanih lokacija bilo kontaminirano, na pet lokacija je bilo jako zagađeno i samo na tri lokacije nezagađeno. Među ispitivanim 16 PAU u uzorcima zemljišta najzastupljeniji su bili: Phe, Flt, IcP, DhA i BgP. Na osnovu prethodno iznetog, može se zaključiti da je zemljište na području Taizhou-a jako kontaminirano PAU.

Na istom području, Taizhou, u gradu Xinqiao, Gu i sar. [37] ispitivali su uticaj elektronskog otpada na životnu sredinu i ljude koji žive blizu odlagališta e-otpada. Koncentracije VM PAU kretale su se u opsegu od 31,06–750,96  $\mu\text{g}/\text{kg}$  (prosečna koncentracija 328,64  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ), dok su se koncentracije NM PAU kretale od 1,55–302,73  $\mu\text{g}/\text{kg}$  (prosečna koncentracija 85,41  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ). Upoređujući koncentracije NM i VM PAU, može se zaključiti da je na ispitivanom području bila veća zastupljenost VM PAU. Izneto zapažanje se može dovesti u vezu sa činjenicom da su VM PAU zbog svojih fizičko-hemijskih osobina otporniji na raspadanje u zemljištu u poređenju sa NM PAU. Prema klasifikaciji zagađenja zemljišta za 16 PAU datoj od strane autora jedino je zemljište na dve ispitivane lokacije oko reciklažnih radionica u blizini stambenih naselja bilo zagađeno i veoma zagađeno sa prosečnim koncentracijama koje su iznosile 728,25  $\mu\text{g}/\text{kg}$  i 1053,69  $\mu\text{g}/\text{kg}$ . Autori su zaključili da povećane koncentracije VM PAU u neposrednoj blizini stambenih naselja svakako imaju negativan uticaj na ljudsko zdravlje, naročito zbog njihovog kancerogenog i mutagenog delovanja.



He i sar. [35] ispitivali su koncentracije PAU u zemljištu pirinčanih polja na području grada Venlinga (Taizhou, Kina) u toku 2011. i 2016. godine. U oba ispitivana perioda dominantno je bilo prisustvo VM PAU. Koncentracije za  $\Sigma 16$  PAU u 2011. godini kretale su se u opsegu od 190,8–1921,5  $\mu\text{g}/\text{kg}$  (prosečna vrednost 590,4  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ), a u 2016. godini od 58,5–1332,2  $\mu\text{g}/\text{kg}$  (prosečna vrednost 407,3  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ). Koncentracije za  $\Sigma 7$  PAU u 2011. godini kretale su se u opsegu od 80,4–1134,0  $\mu\text{g}/\text{kg}$  (prosečna vrednost 324,8  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ), a u 2016. godini od 27,6–1009,8  $\mu\text{g}/\text{kg}$  (prosečna vrednost 262,8  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ). Prema MDK koje su propisale Holandija i Švedska za 16 PAU (50  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ), 7 PAU (300  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ), kao i urađene klasifikacije zemljišta prema Tabeli 3. od strane autora, zemljište na području Venling se može smatrati zagađenim.

U periodu od 2008-2016. godine, u različitim gradovima i oblastima na području pokrajine Taizhou provincije Zhejiang u Kini, najveća prosečna koncentracija za 16 PAU bila je detektovana na području grada Zeguo u istraživanju Tang-a i sar. [5] koja je iznosila 1118,2  $\mu\text{g}/\text{kg}$  i spadala je u opseg veoma zagađenog zemljišta. Na više ispitivanih lokacija na području Taizhou, u istraživanjima Liao-a i sar. [21] prosečna koncentracija iznosila je 854  $\mu\text{g}/\text{kg}$  i spadala je u opseg zagađenog zemljišta. Prosečne koncentracije u istraživanjima Gu-a i sar. [37] na području grada Xinqiao, na više ispitivanih lokacija, kretale su se u opsegu od 32,61-1053,69  $\mu\text{g}/\text{kg}$ , tako da su spadale u opseg od nezagađenog do veoma zagađenog zemljišta. Ispitivanja He i sar. [35] na području grada Venling-a, prosečne koncentracije iznosile su 590,4  $\mu\text{g}/\text{kg}$  i 407,3  $\mu\text{g}/\text{kg}$ , za 2011. i 2016. godinu, respektivno i spadale su u opseg umereno zagađenog zemljišta.

Pored Kine, Gana i Nigerija su tkđ. predstavnici najugroženijih zemalja, koje se suočavaju sa ogromnim količinama e-otpada, koji se ne tretira na odgovarajući način i što se negativno odražava na zagađenje životne sredine, naročito na zagađenje zemljišta.

U par najvećih gradova Nigerije, Lagosu i Ibadanu, Adeyi i Oyeleke [1] ispitivali su sadržaj PAU u zemljištu koji nastaju kao posledica spaljivanja, nepravilnog odlaganja e-otpada i uopšte, uticaja recikliranja elektronskog otpada. Ispitivali su koncentracije  $\Sigma 16$  PAU na dve dubine zemljišta 0–15 cm i 15–30; detektovane vrednosti koncentracija kretale su se u opsegu od 1756–2224  $\mu\text{g}/\text{kg}$  i 1664–2152  $\mu\text{g}/\text{kg}$ , respektivno. Ukupne koncentracije PAU u zemljištu blizu deponije bile su mnogo veće od koncentracije sa kontrolne lokacije, na osnovu čega se može zaključiti da je spaljivanje otpada odgovorno za povećane koncentracije PAU u zemljištu oko

deponije. PAU velike molekulske mase bili su dominantni u zemljištu širom deponije otpada uključujući ukupne koncentracije 16 prioriternih PAU i 5 kancerogenih na obe ispitivane dubine zemljišta, pri čemu benzo(a)fluoranten i benzo(a)piren, nisu bili detektovani ni u jednom uzorku. Iako nije data klasifikacija zagađenja zemljišta od strane autora, na osnovu opsega koncentracija može se zaključiti da je na ispitivanom području na obe dubine zemljišta bilo prisutno visoko zagađenje.

Godine 2015. Onyema i sar. [6] ispitivali su sadržaj PAU u zemljištu oko radionice koja se bavi reciklažom elektronskog otpada u gradu Aba u jugo-istočnom delu Nigerije. Na ovom području takođe se ne poštuju uobičajeni zakonski propisi o odlaganju otpada, već se koriste metode reciklaže koje nisu validne, a u kojima se e-otpad spaljuje radi korišćenja vrednih materijala. Istraživači su pratili koncentracije PAU u zemljištu na različitim udaljenostima od izvora zagađenja. Detektovane koncentracije na lokaciji spaljivanja otpada iznosile su 117,6 mg/kg (zemljište oko izvora zagađenja), 201,7 mg/kg (30 m od izvora zagađenja) i 198,3 mg/kg (70 m od izvora zagađenja). Na području grada Aba u ispitivanom zemljištu detektovano je svih 16 prioriternih PAU. U uzorku zemljišta na lokaciji spaljivanja otpada bilo je dominantno prisustvo VM PAU (94,09%), koji su karakteristični za procese spaljivanja.

Iste godine, Moeckel i sar. [30] ispitivali su koncentracije PAU u zemljištu oko dve deponije e-otpada, Kingtom i Agbobloshie, u glavnom gradu Akra u Gani. Ukupne koncentracije za 16 prioriternih PAU kretale su se u opsegu od 130–5200 ng/g u zemljištu deponije u Kingtom-u, dok su se koncentracije na deponiji u Agbobloshie-ju kretale u opsegu od 850–10000 ng/g. Koncentracije svih analiziranih PAU jedinjenja kretale su se od 60–14000 ng/g u Kingtom-u i od 1300–16000 ng/g u uzorcima u Agbobloshie-ju. Detektovane koncentracije za  $\Sigma 16$  PAU na obe ispitivane lokacije bile su slične koncentracijama koje su detektovane na odlagalištima e-otpada na drugim ispitivanim lokacijama u većim gradovima, ali su koncentracije bile četiri puta veće od koncentracija u nezagađenom zemljištu. Povećane koncentracije svakako ukazuju na antropogeno poreklo, koje se može povezati sa sagoravanjem otpada iz domaćinstva, spaljivanjem otpada na deponijama, kao i širokim spektrom procesa sagorevanja u obližnjim većim gradovima, kao što je Fritaun. U svim uzorcima zemljišta bili su dominantni PAU sa 3 i 4 prstena, koji su karakteristični za tropska zemljišta po Wilcke-u [40]. Međutim, upoređujući procenat VM PAU (4-7 prstenova) na obe ispitivane lokacije koji se kretao od 41–81% i 12–44%, procenat VM PAU bio je značajno veći u Agbobloshie-ju u poređenju sa Kingtom-om; dobijene vrednosti ukazale su da

pirogeni izvori imaju veliki uticaj na zagađenje zemljišta u Agbogbloshe-ju u poređenju sa Kingtom-om gde je identifikovano i petrogeno i pirogeno poreklo [30].

Iako autori nisu prikazali poređenje za zagađenje zemljišta na osnovu klasifikacije date u Tabeli 3. može se primetiti da su na području grada Akra u Gani i Aba u Nigeriji detektovane izuzetno visoke koncentracije za  $\Sigma 16$  PAU, koje su višestruko prelazile prag za veoma zagađeno zemljište. Akra važi za jedan od najurbanijih i najmodernijih gradova Afrike. Pored uticaja spaljivanja e-otpada na povećane koncentracije PAU u zemljištu, smatra se da su za povećane koncentracije u zemljištu odgovorni i drugi izvori zagađenja, koji su karakteristični za PAU, kao što su: sagorevanje uglja, saobraćaj koji predstavlja jedan od dominantnih izvora zagađenja PAU (izduvni gasovi automobila, kamiona i motocikla) i atmosferska depozicija.

#### 4. ZAKLJUČAK

Poslednjih godina velika pažnja je usmerena na ispitivanje uticaja reciklaže e-otpada na zagađenje zemljišta u Kini i zemljama u razvoju, koje se suočavaju sa velikim količinama e-otpada deportovanog iz razvijenih zemalja.

Aktivnosti vezane za reciklažu e-otpada, koje se ne odvijaju po pozitivnim zakonskim propisima značajno utiču na zagađenje zemljišta. U ove procese reciklaže e-otpada spada i proces spaljivanja kada se oslobađaju različite toksične supstance uključujući i PAU, koji se talože i akumuliraju u zemljištu u blizini izvora zagađenja.

Na osnovu dostupnih podataka o prosečnim koncentracijama 16 PAU u zemljištu bližem, ili daljem od deponija i spalionica e-otpada u različitim gradovima i oblastima u Kini, može se uočiti da je najveći prosečan sadržaj bio na području grada Guiyu, u provinciji Guangdong (1239  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ), koji spada u kategoriju veoma zagađenog zemljišta. Takođe, jasno je da su različite ispitivane lokacije na području Kine pokazale i različite vrednosti prosečnih koncentracija 16 PAU, tako da nije moguće izvući nijedan validan i potpuno adekvatan zaključak o porastu, ili opadanju ovih koncentracija tokom protoka vremena. Ipak, uopšteno posmatrano, primetan je jedan generalni trend njihovog povećanja i samim tim povećanja zagađenja zemljišta u toku vremena.

Na području Afrike tkđ. su ispitivane različite deponije i mesta reciklaže e-otpada i to u više većih gradova. Prosečne koncentracije za ispitivana mesta u Africi, nisu bile izračunate ni u jednom slučaju, ali su bili primećeni izuzetno visoki opsezi koncentracija za  $\Sigma 16$  PAU (naročito u gradovima Aba u Nigeriji i Akra u Gani), koji su višestruko pre-

lazili prag za veoma zagađeno zemljište i takođe ovi opsezi su najčešće bili veći od onih zabeleženih u Kini, što može biti signal izuzetno niskog nivoa zaštite životne sredine na afričkom kontinentu.

Generalno, može se reći da je na svim ispitivanim mestima bila prisutna kontaminacija zemljišta PAU (u manjoj, ili većoj meri), kao i da je samo jedan prosečan sadržaj 16 PAU spadao u opseg nezagađenog zemljišta (32,61  $\mu\text{g}/\text{kg}$  na jednoj od ispitivanih lokacija na području grada Xinqiao, Kina).

Na kraju, kada je reciklaža e-otpada u pitanju, može se zaključiti da glavni izvor zagađenja PAU-jedinjenjima svakako predstavljaju pirogeni izvori koji se odnose na procese spaljivanja, ili topljenja e-otpada. U tom smislu, usvajanje ekoloških rešenja tokom celog životnog veka proizvoda, od faze dizajna do kraja njegove upotrebe (uključujući ponovnu upotrebu određenih delova), smanjilo bi stvaranje e-otpada, a usvajanjem pozitivnih zakonskih propisa o rukovanju, odlaganju i recikliranju ovog otpada, sprečilo bi se, ili bar smanjilo zagađenje životne sredine.

#### Zahvalnica

*Autori se zahvaljuju Ministarstvu prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Srbije za finansijsku podršku (Ugovor br. 451-03-68/2022-14/200131).*

#### 5. LITERATURA

- [1] A.Adeyi, P.Oyeleke (2017) Heavy Metals and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil from E-waste Dumpsites in Lagos and Ibadan, Nigeria, *Journal of Health & Pollution*, 7(15), 71–84.
- [2] A.Oketola, S.Akpotu (2015) Assessment of solid waste and dumpsite leachate and topsoil, *Chemistry and Ecology*, 31(2), 134–146.
- [3] E.Awere, P.Obeng, A.Bonoli, P.Obeng (2020) E-waste recycling and public exposure to organic compounds in developing countries: a review of recycling practices and toxicity levels in Ghana, *Environmental Technology Reviews*, 9(1), 1–19.
- [4] A.Leung, Z.Wei Cai, M.Huang Wong (2006) Environmental contamination from electronic waste recycling at Guiyu, southeast China, *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 8, 21–33.
- [5] X.Tang, C.Shen, S.A.Cheema., L.Chen, X.Xiao, C.Zhang, W.Liu, F.Li, Y.Chen (2010) Levels and distributions of polycyclic aromatic hydrocarbons in agricultural soils in an emerging e-waste recycling town in Taizhou area, China, *Journal of Environmental Science and Health Part A*, 45(9), 1076–1084.
- [6] M.Onyema, C.Obasi, N.Okoye, L.Osuji (2017) Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils within Vicinity of an Electronic Waste Open Burning Workshop in Aba, South East Nigeria, *International Journal of Sciences: Basic and Applied Research*, 35(1), 286–293.

- [7] D.-Y.Huang, C.-P.Liu, F.-B. Li, T.-X Liu., C.-S.Liu, L. Tao, Y.Wang (2014) Profiles, sources, and transport of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils affected by electronic waste recycling in Longtang, south China, *Environmental Monitoring Assessment*, 186(6), 3351–3364.
- [8] C.Shen, Y.Chen, S.Huang, Z.Wang, C.Yu, M.Qiao, Y.Xu, K.Setty, J.Zhang, Y.Zhu, Q. Lin (2009) Dioxin-like compounds in agricultural soils near e-waste recycling sites from Taizhou area, China: Chemical and bioanalytical characterization, *Environment International*, 35(1), 50–55.
- [9] S.Alagić, B.Maluckov, V.Radojičić (2015) How can plants manage polycyclic aromatic hydrocarbons? May these effects represent a useful tool for an effective soil remediation? A review, *Clean Technologies and Environmental Policy*, 17(3), 597–614.
- [10] S.Alagić, V.Stankov Jovanović V.Mitić, J.Cvetković, G.Petrović, G.Stojanović (2016) Bioaccumulation of HMW PAHs in the roots of wild blackberry from the Bor region (Serbia): Phytoremediation and biomonitoring aspects, *Science of the Total Environment*, 562, 561–570.
- [11] S.Alagić, V.Stankov Jovanović, V.Mitić, J.Nikolić, G. Petrović, S.Tošić, S.Stojanović (2017) The effect of multiple contamination of soil on LMW and MMW PAHs accumulation in the roots of *Rubus fruticosus* L. naturally growing near The Copper Mining and Smelting Complex Bor (East Serbia), *Environmental Science and Pollution Research*, 24(18), 15609–15621.
- [12] K.Dhar, S.Subashchandrabose, K.Venkateswarlu, K.Krishnan, M.Megharaj (2019) Anaerobic Microbial Degradation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons: A Comprehensive Review, *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 251, 27–108.
- [13] J.Ifemeje, S.Udedi, C.Lukong, A.Okechukwu, C. Egbuna (2014) Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Heavy Metals in Soils from Municipal Solid Waste Landfill, *British Journal of Applied Science & Technology* 4(36), 5058–5071.
- [14] J.Simon, J.Sobieraj (2006) Contributions of Common Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons to Soil Contamination, *Remediation Journal*, 16(3), 25–35.
- [15] <http://www.epa.gov/osw/hazard/wastemin/priority.htm>
- [16] Y.Wang, J.He, S.Wang, C.Luo, H.Yin, G.Zhang (2017) Characterisation and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soils and plants around e-waste dismantling sites in southern China, *Environmental Science and Pollution Research*, 24(28), 22173–22182.
- [17] B.Wilkomirski, Z.Jabbarov, T.Abdrahmanov, M. Vokhidova, B.Jabbarov, F.Fakhrudinova, A. Okolelova, S.Kholdorov, Y.Abdullayeva (2018) Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Natural and Anthropogenically Modified Soils (A Review), *Biogeosystem Technique*, 5(2), 229–243.
- [18] A.Haritash, C.Kaushik (2009) Biodegradation aspects of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs): A review, *Journal of Hazardous Materials*, 169(1-3), 1–15.
- [19] D.Ghosal, S.Ghosh, T.Dutta, Y.Ahn (2016) Current State of Knowledge in Microbial Degradation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs): A Review, *Frontiers in Microbiology*, 7, 1369.
- [20] K.Ilijević, I.Gržetić (2008) Dugotrajni organski загаđivači (POPs), *Hemijski pregled*, 49(6), 137–145.
- [21] C.Liao, J.Lv, J.Fu, Z.Zhao, F.Liu, Q.Xue, G.Jiang (2012) Occurrence and profiles of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), polychlorinated biphenyls (PCBs) and organochlorine pesticides (OCPs) in soils from a typical e-waste recycling area in Southeast China, *International Journal of Environmental Health Research*, 22(4), 317–330.
- [22] S.Sakshi, S.Singh, A.Haritash (2019) Polycyclic aromatic hydrocarbons: soil pollution and remediation, *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16, 6489–6512.
- [23] J.Nikolić (2018) Optimizacija postupaka pripreme uzoraka zemljišta za kvantitativnu analizu policikličnih aromatičnih ugljovodonika primenom metode gasna hromatografija-masena spektrometrija, *Doktorska disertacija, Univerzitet u Nišu, Prirodno matematički fakultet, Niš*.
- [24] M.Thiombane, S.Albanese, M.Di Bonito, A.Lima, D.Zuzolo, R.Rolandi, S.Qi, B.De Vivo (2019) Source patterns and contamination level of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in urban and rural areas of Southern Italian soils, *Environmental Geochemistry and Health*, 41, 507–528.
- [25] B.Reid, K.Jones, K.Semple (2000) Bioavailability of persistent organic pollutants in soils and sediments a perspective on mechanisms, consequences and assessment, *Environmental Pollution* 108, 103–112.
- [26] A.Wick, N.Haus, B.Sukkariyah, K.Haering, W. Daniels (2011) Remediation of PAH-contaminated soils and sediments: a literature review, *Virginia Polytechnic Institute, Blacksburg, Department of Crop and Soil Environmental Sciences Blacksburg, VA 24061*.
- [27] A.Melnyk, A.Dettlaff, K.Kuklińska, J.Namieśnik, L. Wolska (2015) Concentration and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and polychlorinated biphenyls (PCBs) in surface soil near a municipal solid waste (MSW) landfill, *Science of The Total Environment*, 530–531, 18–27.
- [28] O.Olayinka, O.Adedeji, A.Ipeaiyeda (2015) Determination of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) on Selected Dumpsites in Abeokuta Metropolis, SW, Nigeria, *Applied Environmental Research*, 37(3), 33–48.
- [29] X.Yu, Y.Gao, S.Wu, H.Zhang, K.Cheung, M.Wong (2006) Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils at Guiyu area of China, affected by recycling of electronic waste using primitive technologies, *Chemosphere*, 65(9), 1500–1509.

- [30] C.Moeckel, K.Breivik, T.Nøst, A.Sankoh, K.Jones, A.Sweetman (2020) Soil pollution at a major West African E-waste recycling site: Contamination pathways and implications for potential mitigation strategies, *Environment International*, 137, 105563.
- [31] O.Tzoraki, M.Lasithiotakis (2018) Environmental Risks Associated with Waste Electrical and Electronic Equipment Recycling Plants, Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences, p.1–10.
- [32] K.Habib Al Razi (2016) Resourceful recycling process of waste desktop computers: A review study, *Resources, Conservation and Recycling*, 110, 30–47.
- [33] A.Sepúlveda, M.Schluep, F.Renaud, M.Streicher, R.Kuehr, C.Hagelüken, A.Gerecke (2010) A review of the environmental fate and effects of hazardous substances released from electrical and electronic equipments during recycling: Examples from China and India, *Environmental Impact Assessment Review*, 30, 28–41.
- [34] Y.Gao, Y.Wang, Q.Zhou (2015) Distribution and temporal variation of PCBs and PAHs in soils and sediments from an e-waste dismantling site in China, *Environmental Earth Sciences*, 74(4), 2925–2935.
- [35] M.He, S.Yang, J.Zhao, C.Collins, J.Xu, X.Liu (2019) Reduction in the exposure risk of farmer from e-waste recycling site following environmental policy adjustment: A regional scale view of PAHs in paddy fields, *Environment International*, 133, 105136.
- [36] Službeni Glasnik Republike Srbije br. 30/2018 i 64/2019.
- [37] W.Gu, J.Bai, W.Yuan, E.Ma, C.Zhang, J.Wang (2019) Pollution analysis of soil polycyclic aromatic hydrocarbons from informal electronic waste dismantling areas in Xinqiao, China, *Waste Management & Research*, 37(4), 394–401.
- [38] B.Maliszewska-Kordybach (1996) Polycyclic aromatic hydrocarbons in agricultural soils in Poland: preliminary proposals for criteria to evaluate the level of soil contamination, *Applied Geochemistry*, 11(1-2), 121–127.
- [39] Y.Wang, Z.Tian, H.Zhu, Z.Cheng, M.Kang, C. Luo, J.Li, G.Zhang (2012) Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soils and vegetation near an e-waste recycling site in South China: Concentration, distribution, source, and risk assessment, *Science of The Total Environment*, 439, 187–193.
- [40] W.Wilcke (2000) Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Soil - a Review, *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 163, 229–248..

## ABSTRACT

### The content of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil formed during incineration of e-waste at the sites of its inadequate disposal and recycling

*Electronic and electric (e-) waste is a major environmental problem worldwide. An improper handling, disposal and recycling of e-waste lead to the negative impacts on the environment, especially on soil pollution. It is known that, in the environment, organic pollutants such as polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), can be formed in several ways, including the pyrolytic processes during the incineration of e-waste. Given that these organic substances are very toxic, even in extremely low concentrations, the main goal of this paper was to present a literature review of PAHs in the soil near the sites for the disposal and recycling of e-waste that are not regulated according to the adequate, positive legislations.*

**Keywords:** PAHs, e-waste, pollution, soil, recycling, incineration

*Review paper*

*Paper received: 16. 12. 2021.*

*Paper corrected: 17. 01. 2022,*

*Paper accepted: 19. 01. 2022.*

*Paper is available on the website: [www.idk.org.rs/journal](http://www.idk.org.rs/journal)*