

Predviđanje emisija odabranih zagađujućih materija vazduha u Beogradu korišćenjem veštačkih neuronskih mreža

Davor Antanasijević¹, Sonja Nikolić², Viktor Pocaž²,
Mirjana Ristić², Aleksandra Perić-Grujić²

Originalni naučni rad
UDC:504.3.054.001.13

UVOD

Vazduh koji sadrži visoke koncentracije zagađujućih materija, nepovoljno utiče na zdravlje ljudi i čitav ekosistem. Poznavanje kvaliteta ambijentalnog vazduha u urbanim sredinama od posebnog je značaja, zbog velikog broja izvora zagađujućih materija (termoenergetska postrojenja, saobraćaj, industrija, individualne kotlarnice i sl.), a njihove emisije SO₂, NO_x, CO, čađi, suspendovanih čestica značajno narušavaju kvalitet vazduha. Neki od najznačajnijih antropogenih izvora odabranih zagađujućih materija vazduha prikazani su u tabeli 1.

Tabela 1 - Najznačajniji antropogeni izvori odabranih zagađujućih materija vazduha

Zagađujuće materije	Antropogeni izvori
NO _x	Procesi sagorevanja u proizvodnji električne i toplotne energije, saobraćaj
SO _x	Sagorevanje goriva koja sadrže sumpor u termoelekttranama, stacionarni procesi sagorevanja, industrijski procesi
PM ₁₀ *	Proizvodnji električne i toplotne energije, saobraćaj i industrija
GHG**	Sagorevanje fosilnih goriva za dobijanje energije, proizvodnja cementa

*PM10 - frakcija suspendovanih čestica (*particulate matter*) koja prolazi kroz filter čiji su zahtevi utvrđeni u standardu SRPS EN12341

**Gasovi staklene bašte (*Greenhouse gases* - GHG)

Kako bi se stekao jasan uvid u izvore emisije, mnoge države su u svoju zakonsku regulativu implementirale registre zagađivača, čiji je cilj kontrola i ograničenje emisije zagađujućih materija. Izrada i vođenje nacionalnog i lokalnih registra izvora zagađivanja životne sredine Republike Srbije definisana je Zakonom o izmenama i dopunama zakona o zaštiti životne sredine [1].

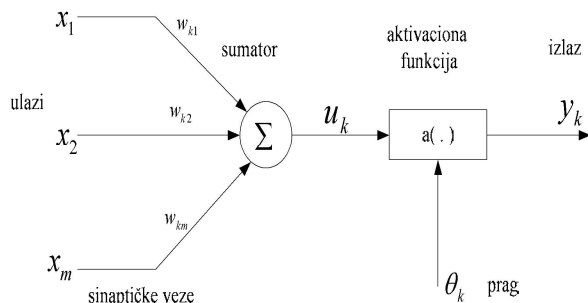
Adrese autora: ¹Univerzitet u Beogradu, Inovacioni Centar Tehnološko-metalurškog fakulteta, Beograd, ²Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Karnegijeva 4, Beograd, Srbija
Rad primljen: 15. 07. 2013.

Registar izvora zagađivanja životne sredine je skup sistematizovanih podataka i informacija o vrstama, količinama, načinu i mestu unošenja, ispuštanja ili odlaganja zagađujućih materija u gasovitom, tečnom i čvrstom agregatnom stanju ili ispuštanja energije (buke, vibracija, toplote, jonizujućeg i nejonizujućeg zračenja) iz tačkastih, linijskih i površinskih izvora zagađivanja u životnu sredinu [1]. Registar izvora zagađivanja životne sredine predstavlja osnovu za: 1) odgovornu politiku u oblasti zaštite životne sredine, 2) implementaciju čistije proizvodnje i 3) stimulisane uvođenja čistijih tehnologija i omogućava kontrolu mera zaštite.

U Beogradu se nalazi veliki broj industrijskih postrojenja i pogona koji emituju zagađujuće materije u vazduh, vodu, zemljište, a takođe su generatori opasnog i neopasnog otpada. Neki od njih, veliki zagađivači, su obuhvaćeni Nacionalnim registrom izvora zagađivanja, koji vodi Agencija za zaštitu životne sredine, dok se manji zagađivači prate u okviru Lokalnog registra. Lokalni registar izvora zagađivanja vodi nadležni organ jedinice lokalne samouprave na svojoj teritoriji, kako bi se pratile kvalitativne i kvantitativne promene u životnoj sredini i preduzimale odgovarajuće mere zaštite i unapređenja stanja u životnoj sredini. Vođenje registra izvora zagađivanja na lokalnom nivou posebno je korisno i zbog pojave sve većeg broja malih preduzeća i individualnih delatnosti, čiji način rada, metodologija i sirovine koje se koriste, nisu uvek dobro ispitane i poznate, tako da je neophodno imati podatke o vrstama i količinama zagađujućih materija koje emituju.

Veštačke neuronske mreže (*Artificial neural Networks* – ANN) su relativno nova i sofisticirana tehnika modelovanja. Predstavljaju kompjuterske programe dizajnirane da simuliraju neke funkcije ljudskog mozga, kao što su: učenje, sposobnost generalizacije i donošenje zaključaka iz stečenog iskustva. Koristeći različite algoritme za učenje, one uočavaju veze i šablone unutar grupe podataka koja im se prezentuje i na taj način stiču sposobnost da predvide odgovore na nove eksperimentalne uslove. Neuronske mreže uočavaju zakonitosti u skupovima podataka koji su im na raspolaganju u procesu obučavanja i na osnovu njih

odlučuju, klasifikuju i predviđaju. S obzirom da se svi ovi procesi simuliraju na računaru, neuronske mreže su postale primenljive razvojem algoritama za obučavanje, softverskog inženjerstva i računarskih resursa [2]. Osnovni element neuronske mreže je simulirani biološki neuron, takozvani veštački neuron, čiji šematski prikaz je dat na slici 1.



Slika 1 - Šematski prikaz strukture veštačkog neurona [3]

Neuronska mreža procesira određeni broj ulaza, datih iz spoljnog sveta, da bi se dobio izlaz, odnosno klasifikacija ili prognoza. Neuroni su povezani sinapsama, odnosno težinskim koeficijentima, koji se primenjuju na vrednosti prosleđene od jednog neurona drugom. Kada se na ulaz neurona do-

vedu vrednosti i pomnože težinskim koeficijentima (w_k), dobijaju se ulazni podaci. Zbir ulaznih vrednosti neurona, pomnoženih sa odgovarajućim težinskim koeficijentima, se propušta kroz aktivacionu funkciju i ta vrednost predstavlja izlaz iz neurona.

1. ANN EMISIONI MODELI

1.1. Ulazne veličine modela

Za predviđanje emisije NO_x , SO_x , gasova staklene bašte (GHG) i PM_{10} u vazduh, na godišnjem nivou za Grad Beograd korišćeni su do sada razvijeni i primenjeni modeli zasnovani na neuronskim mrežama [4, 5, 6] i indikatorima održivog razvoja [7, 8].

Kod razvoja modela za predikciju emisije kiselih oksida (NO_x i SO_x), s obzirom da emisiji NO_x i SO_x najviše doprinose sektori transporta, proizvodnje i distribucije energije, komercijalni i sektor domaćinstva, odabrane su sledeće ulazne veličine: bruto domaći proizvod, električna energija proizvedena iz obnovljivih izvora, potrošnja energije u transportu, bruto potrošnja energije po čvrstom gorivu, stopa motorizacije, domaća potrošnja materijala, potrošnja energije u drumskom transportu.

Tabela 2 - Ulazne promenljive, izvori i načini procene podataka za Grad Beograd

ANN Model	Ulazni indikator	Izvor podataka/Način procene
NO_x/SO_x , PM_{10} , GHG	Bruto domaći proizvod (BDP) po stanovniku normalizovan sa BDP-om EU27	Na osnovu podataka Privredne komore Beograda [9], BDP Beograda aproksimiran je kao 40 % od BDP-a Republike Srbije. Kako broj stanovnika u Beogradu iznosi 24 % od ukupnog broja stanovnika u Srbiji, koeficijent kojim je BDP Beograda procenjen na osnovu BDP-a R. Srbije iznosi 1,67
NO_x/SO_x , PM_{10}	Broj motornih vozila po stanovniku	Procenjena na osnovu rada Antanasijević i sar. [6]
NO_x/SO_x , GHG	Udeo obnovljivih izvora energije	Procenjena na osnovu [5]
PM_{10} , GHG	Potrošnja energije po stanovniku	Procenjena na osnovu [10]
NO_x/SO_x	Potrošnja goriva u saobraćaju	Procenjeni na osnovu podataka za R. Srbiju.
	Udeo potrošnje energije u saobraćaju u odnosu na ukupnu potrošnju energije*	
	Potrošnja čvrstih goriva	
	Potrošnja materijala	Procenjena na osnovu [10]
	Energetska intenzivnost	Na osnovu [11]
PM_{10}	Proizvodnja papira i proizvoda od papira	Na osnovu podataka Fabrike Hartije AD Beograd [12]
GHG	Udeo poljoprivrede u BDP	Procena na osnovu podataka za R. Srbiju [13]
	Udeo industrije u BDP	
	Putnici prevezeni aviosaobraćajem	Na osnovu podataka aerodroma Nikola Tesla [14]
	Roba prevezena aviosaobraćajem	
	Prosečna starost vozila	Mediana sajt [15]
	Električna energija proizvedena iz obnovljivih izvora	Na osnovu podataka Privredne komore Beograda [9]
	Generisan KČO	
Deponovan KČO		

*izražena u tonama ekvivalentne nafte

ANN emisioni model za PM₁₀ razvijen je korišćenjem više ulaznih indikatora, u poređenju sa ANN modelom za predikciju kiselih oksida. S obzirom da industrija, proizvodnja energije i saobraćaj imaju najviše uticaja na emisiju čestičnih materija, odabrane su sledeće ulazne veličine: bruto domaći proizvod, bruto unutrašnja potrošnja energije, spaljivanje drveta, stopa motorizacije, proizvodnja papira i kartona, proizvodnja aluminijuma, proizvodnja rafinisanog bakra, proizvodnja rezanog drveta, proizvodnja sirovog gvožđa i sirovog čelika.

Kako na emisiju GHG najviše utiču industrija, proizvodnja energije i transport, za ulazne veličine GHG emisionog ANN modela odabrani su: bruto domaći proizvod (BDP), udeo industrije i poljoprivrede u BDP-u, udeo obnovljivih izvora energije, električna energija proizvedena iz obnovljivih izvora, bruto unutrašnja potrošnja energije, prosečna starost motornih vozila, količina generisanog i deponovanog komunalnog čvrstog otpada (KČO) i broj putnika i količina robe prevezene aviosaobraćajem.

1.2. Ulazni podaci za Grad Beograd

U tabeli 2 prikazani su izvori podataka i načini procene podataka koji nisu bili dostupni za grad Beograd. Na osnovu izvora podataka, tj. načina procene, dobijene su vrednosti ulaznih parametara za koje je poznato da najviše utiču na vrednost emisije odabranih zagađujućih materija. Vrednosti ulaznih parametara izračunate su za 2008., 2009., i 2010. godinu, i na osnovu kojih je izvršeno modelovanje emisije zagađujućih materija za Grad Beograd (tabela 3).

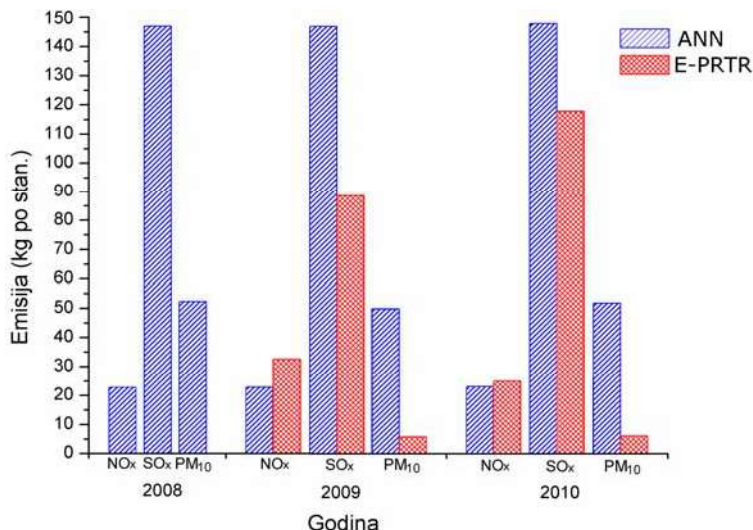
Tabela 3 - Ulazni podaci za emisione modele

Model	Ulazna promenljiva	Godina		
		2008.	2009.	2010.
NO _x /SO _x , PM ₁₀ , GHG	BDP po stan. i po BDP (EU27)	0,23	0,25	0,26
NO _x /SO _x , PM ₁₀	Broj motornih vozila po stanovniku	0,289	0,318	0,307
NO _x /SO _x , GHG	Udeo obnovljivih izvora energije (%)	5,5	6,0	6,5
PM ₁₀ , GHG	Potrošnja energije (toe* po stan.)	2,5	2,6	2,7
NO _x /SO _x	Potrošnja čvrstih goriva (toe po stan.)	0,50	0,48	0,47
	Energetska intenzivnost (toe po 1000 €)	0,30	0,32	0,36
	Potrošnja goriva u saob. (toe po stan.)	0,178	0,168	0,166
	Udeo potrošnje energije u saobraćaju	0,29	0,28	0,27
	Potrošnja materijala (t po stanovniku)	4,02	3,78	3,90
PM ₁₀	Proizvodnja papira (kg po stanovniku)	17	17	17
GHG	Udeo poljoprivrede u BDP	0,10	0,10	0,10
	Udeo industrije u BDP	0,22	0,22	0,22
	Putnici prevezeni aviosaob. (put. po stan.)	1,53	1,38	1,56
	Roba prevezena aviosaob. (t po stan.)	0,0047	0,0039	0,0043
	Prosečna starost vozila (god.)	14,9	14,3	13,8
	Električna energija proizvedena iz obnovljivih izvora	0,40	0,40	0,40
	Generisan KČO (t po stan.)	0,390	0,390	0,390
	Deponovan KČO (t po stan.)	0,390	0,390	0,390

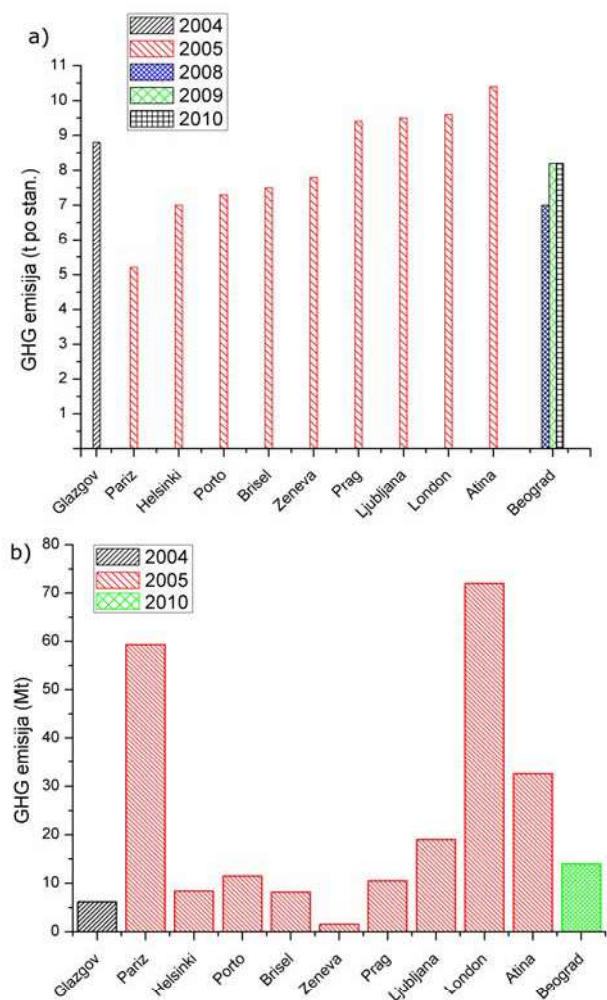
*tona ekvivalentne nafte

2. REZULTATI I DISKUSIJA

Dobijeni rezultati, kod predviđanja emisija NO_x, SO_x i PM₁₀, prikazani su na Slici 2. Na osnovu ovih podataka (slika 2.) može se zaključiti da je najveća, u sve tri posmatrane godine, bila emisija sumpornih oksida, dok je najmanja emisija azotnih oksida. Na slici 2 prikazane su i vrednosti emisija navedenih zagađujućih materija u 2009. i 2010. godini, na osnovu podataka prikupljenih izveštavanjem za Nacionalni registar izvora zagađivanja, a prikazanih u okviru Evropskog registra izvora zagađivanja (*The European Pollutant Release and Transfer Register - E-PRTR*) [16]. Dobro slaganje predikcija modela i E-PRTR vrednosti kod emisije NO_x pokazuje da su glavni izvori njihove emisije sektor proizvodnje energije i industrijski sektor, koji su obuhvaćeni E-PRTR registrom. S obzirom da su podaci o emisiji SO_x, u okviru E-PRTR dostupni od 2009. godine i da je zabeležen porast emisije za 2010. godinu od 20 %, može se zaključiti da je razlika između vrednosti dobijenih modelom i podataka E-PRTR-a, u slučaju emisije SO_x, uslovljena činjenicom da Registrom, za 2009. i 2010. godinu, nisu bili obuhvaćeni svi izvori emisije na teritoriji Grada Beograda. Mijić i sar. [17] su pokazali da su glavni sektori emisije PM₁₀ čestica u Beogradu proizvodnja energije (34 %), saobraćaj (26 %) i industrija (26 %), pa je razlog za veliko odstupanje između ANN i E-PRTR vrednosti emisija PM₁₀ najverovatnije činjenica da Registrom zagađivača u posmatranom periodu, nisu bili obuhvaćeni svi zagađivači u najvažnijim sektorima njihove emisije, pri čemu se emisija iz saobraćaja i ne prati u okviru E-PRTR-a.



Slika 2 - Poređenje predikcije emisija NO_x, SO_x i PM₁₀ sa E-PRTR vrednostima



Slika 3 - Predikcija GHG emisije za Beograd i vrednosti za odabrane gradove evropskih država [18,19]: a) emisija po stanovniku b) ukupna emisija

Na osnovu dobijenih rezultata predviđanja emisije gasova staklene bašte (slika 3), može se uočiti

trend porasta emisije GHG u periodu 2008-2010., pri čemu se u 2009. emisija povećala za 17 %, u odnosu na 2008. godinu. Na E-PRTR sajtu nema podataka o GHG emisiji u Srbiji [16]. S obzirom da je najveći udeo GHG emisije u energetskom sektoru i sektoru industrije, može se pretpostaviti da su ovi sektori odgovorni za njeno povećanje. Kako bi se predviđena emisija za Beograd uporedila sa dostupnim podacima, na slici 3 su date i vrednosti GHG emisija za pojedine evropske gradove, za koje su podaci bili dostupni. Može se uočiti da se modelom predviđena GHG emisija u Beogradu nalazi u okviru GHG emisije u posmatranim evropskim gradovima. Beogradu je po broju stanovnika i ostalim ekonomskim obeležjima najsljedniji Prag, pa se predviđene GHG emisije za Beograd mogu direktno porediti sa dostupnom emisijom za Prag za 2005. godinu [18]. Na slici 3 se može videti da je predviđena GHG emisija za 2010. godinu u Beogradu niža za 12 %, u odnosu na emisiju u Pragu tokom 2005. godine. Ukupne emisije najviše su kod velikih gradova (London, Pariz i Atina), dok je modelom predviđena GHG emisija za Beograd u 2010. i na nivou emisija u Portu i Pragu u 2005. godini.

ZAKLJUČAK

Intenzivan industrijski razvoj, pored značajnih prednosti, utiče i na povećanu emisiju zagađujućih materija u sve delove životne sredine (vazduh, voda, zemljište). Kako bi se stekao jasan uvid u izvore emisije, implementirani su registri zagađivača u mnogim zemljama, koji se vode kako bi se pratile kvalitativne i kvantitativne promene u životnoj sredini i preduzimale odgovarajuće mere zaštite i unapređenja stanja u životnoj sredini. Predviđanje emisija zagađujućih materija je od velikog značaja, kako bi donosioci odluka na vreme mogli da pronađu

adekvatna rešenja, donesu odgovarajuće odluke i implementiraju ih u praksi.

Veštačke neuronske mreže mogu uspešno da se primene za predviđanje emisija zagađujućih materija u vazduh, polazeći od ulaznih parametara, indikatora održivog razvoja, koji su široko dostupni i kontinualno praćeni. Na osnovu već razvijenih modela, zasnovanih na neuronskim mrežama, u ovom radu vršeno je modelovanje emisije NO_x, SO_x, PM₁₀ i gasova staklene bašte u vazduh, na godišnjem nivou za Grad Beograd. Predviđanja emisije su vršena za period od 2008. do 2010. godine, na osnovu dostupnih ulaznih podataka za grad Beograd.

Dobijeni rezultati pokazuju da je emisija sumpornih oksida za sve tri posmatrane godine bila mnogo viša od emisija NO_x (oko 7 puta) i PM₁₀ (oko 3 puta). Na osnovu dobijenih rezultata za GHG može se zaključiti da se GHG emisija povećala u 2010. za 17 % u odnosu na 2008. godinu. Poređenje modelom predviđene GHG emisije za Beograd u 2010. godini, sa dostupnim podacima za emisiju u odabranim evropskim gradovima sa sličnim brojem stanovnika, pokazuje da je GHG emisija u Beogradu niža u odnosu na posmatrane evropske gradove u 2005. godini, što je pre svega posledica smanjene industrijske aktivnosti na području Beograda.

Zahvalnica

Istraživanja su realizovana u okviru naučnog projekta Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije, broj 172007.

LITERATURA

- [1] Zakon o izmenama i dopunama zakona o zaštiti životne sredine, Sl. glasnik RS, broj 36/09.
- [2] Pocajt, V., Razvoj modela atmosferske disperzije primenom neuronskih mreža. Doktorska disertacija, Tehnološko-metalurški fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd, 1999.
- [3] Faradejev, A., Mihajlović, V., Neuronske mreže kao metod multivarijacione analize. Studijski istraživački rad, Ekonomski fakultet, Univerzitet u Kragujevcu, Kragujevac, 2009.
- [4] Đorđević, J., Modelovanje emisija sumpornih i azotnih oksida na nacionalnom nivou neuronskim mrežama. Diplomski rad, Tehnološko-metalurški fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd, 2012.
- [5] Antanasijević, D.Z., Ristić, M.Đ., Perić-Grujuć, A.A., Pocajt V.V., Int. J. Greenh. Gas Con. under review, 2013.
- [6] Antanasijević, D. Z., Pocajt V. V., Povrenović, D. S., Ristić, M. Đ., Perić-Grujuć, A. A., Sci. Total Environ. 443, 511-519 pp. 2013.
- [7] Džodan, M., Martinović, D., Jovanović, L., Ecologica, 17, 123-129 pp. 2010.
- [8] Munitlak-Ivanović, O., Golušin M., Ecologica, 18, 355-362 pp. 2011.
- [9] Privredna komora Beograd, <http://www.kombeg.org.rs/>, 2013.
- [10] Antanasijević, D., Pocajt, V., Popović, I., Redžić, N., Ristić, M., Sustain. Sci. 8, 37–46 pp. 2013.
- [11] Jovanović, M., Afgan, N., Radovanović, P., Stevanović, V., Energy, 34, 532– 539 pp. 2009.
- [12] Fabrika Hartije AD Beograd, <http://www.fabrikahartije.rs/>, 2012.
- [13] UNECE, <http://www.unece.org/>, 2013.
- [14] Aerodrom Nikola Tesla Beograd, http://www.beg.aero/o_nama/statistika.190.html, 2013.
- [15] Mediana Adria, <http://www.mediana.co.rs/pocetna-stranica/>, 2013.
- [16] E-PRTR, <http://prtr.ec.europa.eu/PollutantReleases.aspx>, 2013.
- [17] Mijić, Z., Stojić, A., Perišić, M., Rajšić, S., Tasić, M., Chem. Ind. Chem. Eng. Q. 18, 623-634 pp. 2012.
- [18] Kennedy, C., Ramaswami, A., Carney, S., Dhakal, S., Greenhouse gas emission baselines for global cities and metropolitan regions, Proceedings of the 5th Urban Research Symposium, Marseille, France, 28–30 June 2009.
- [19] Kennedy, C., Steinberger, J., Gasson, B., Hansen, Y., Hillman, T., Havranek, M., Pataki, D., Phdungsilp, A., Ramaswami, A., Villalba Mendez, G., Environ. Sci. Technol. 43, 7297–7302 pp. 2009.

IZVOD

PREDVIĐANJE EMISIJA ODABRANIH ZAGAĐUJUĆIH MATERIJAMA VAZDUHA U BEOGRADU KORIŠĆENJEM VEŠTAČKIH NEURONSKIH MREŽA

Do povećanja emisije zagađujućih materija u vazduh, vodu i zemljište došlo je zbog intenzivnog industrijskog razvoja. Kako bi se stekao jasan uvid u izvore emisije, mnoge zemlje su, u svoju zakonsku regulativu, implementirale registre zagađivača, koji predstavljaju osnovu za odgovornu politiku u oblasti zaštite životne sredine, kao i osnovu za implementaciju čistije proizvodnje i stimulisanje uvođenja čistijih tehnologija. Strateški i pravni okvir i sagledavanje postojećeg stanja predstavlja osnovu za izradu Lokalnog registra izvora zagađivanja životne sredine na teritoriji Grada Beograda, čiji je sastavni deo baza podataka o zagađivačima, odnosno vrstama i emitovanim količinama. Predviđanje ovih emisija je od velikog značaja, kako bi donosioci odluka na vreme mogli da pronađu adekvatna rešenja. Modeli zasnovani na neuronskim mrežama se poslednjih godina intenzivno primenjuju za simulacije u oblasti zaštite životne sredine i održivog razvoja. U okviru ovog rada izvršeno je modelovanje emisije u vazduh SO_x , NO_x , PM_{10} i GHG, na godišnjem nivou za Grad Beograd, za period 2008-2010. godina. Dobijeni rezultati pokazuju da je emisija sumpornih oksida za sve tri posmatrane godine bila mnogo viša od emisija NO_x (oko 7 puta) i PM_{10} (oko 3 puta). Na osnovu dobijenih rezultata za GHG može se zaključiti da se GHG emisija povećala u 2010. godini za 17 % u odnosu na 2008. godinu.

Ključne reci: predviđanje emisija zagađujućih materija, Beograd, veštačke neuronske mreže

ABSTRACT

AIR POLLUTANT EMISSION FORECASTING IN BELGRADE USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

Intensive industrial development has led to the increase of pollutants in the air, water and land. In order to gain a clear insight into the sources of emissions, many countries have implemented registers of pollutants in their legislation, which represent the basis for responsible policies in the field of environmental protection, as well as the base for the implementation of a cleaner production and encouraging the introduction of cleaner technologies. Strategic and legal framework and analysis of the current situation represent the base for development of the Local register environmental pollution sources at the territory of Belgrade city. Integral part of the Register is pollutant types and emitted amounts. Predicting these emissions is of a great importance for decision makers when finding adequate solutions for the control. Models based on artificial neural networks have been applied intensively these years in the field of environmental protection and sustainable development. In present work, developed ANN emission models have been applied for the modeling of SO_x , NO_x , PM_{10} , and GHGs emission in the air at annual level for Belgrade, for the period 2008-2010.

Key words: pollutant emission forecast, Belgrade, artificial neural networks (ANN)