

## ANALIZA SIMULACIONOG MODELOVANJA AEROZAGAĐENJA IZ TERMOELEKTRANA I KOPOVA KOSTOLAC

## ANALYSIS OF SIMULATION MODELING OF AIR POLLUTION FROM KOSTOLAC POWER PLANTS AND MINES

Prof. dr. sc. Steva K. Jaćimovski, vanredni profesor  
Prof. dr. sc. Slobodan Miladinović, redovan profesor  
KP Akademija  
Beograd, Srbija

Jovan P. Šetrajčić, akademik  
Univerzitet u Novom Sadu, PMF  
Novi Sad, Vojvodina - Srbija

Prof. dr. sc. Siniša M. Vučenović, vanredni profesor  
Univerzitet u Banjoj Luci, Prirodno-matematički fakultet  
Banja Luka, Republika Srpska – BiH

**Ključne riječi:** Kostolački basen, životna sredina, aerozagađenje, Gausov model

### REZIME

*Parametri koji definišu stanje životne sredine u kostolačkom termoenergetskom basenu u najvećoj mjeri predstavlja posljedicu uticaja TE Kostolac A, TE Kostolac B kao i površinskih kopova lignita. Kvalitet vazduha prati se kontinuiranim mjerenjima koncentracija ukupnih taložnih materija i gasova kao što su CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, O<sub>3</sub>. Utvrđeno je značajno prekoračenje zakonski dozvoljenih vrijednosti zagađujući materija u okolini Termoelektrana Kostolac A i B i u pravcu dominantnog vjetra. U radu je analiziran uticaj različitih scenarija emisija štetnih materija iz blokova TE Kostolac A i B na kvalitet vazduha u ovom dijelu Srbije. Primjenjen je Gausov model za ocjenu disperzije gasovitih materija i suspendovanih čestica, pri određenim vrijednostima emisije zagađujućih materija i parametara vezanih za spoljašnju sredinu. Izračunate su prizemne koncentracije sumpor-dioksida, azotnih-oksida i suspendovanih čestica na različitim udaljenostima od izvora emitera.*

**Keywords:** Kostolac Basin, Environment, Air pollution, Gauss model

### ABSTRACT

*Parameters which define environment conditions are largely qualified with influence of the Kostolac A and Kostolac B energy plants and surface mining of lignite. The air quality is examined continuously by measuring total deposited matter and the emissions of gases such as CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, O<sub>3</sub>. It is found that pollution substances significantly exceed the values determined by the law around energy plants Kostolac A and B, and in the dominant wind direction. In this paper we have analyzed the influence of the harmful gases emission for the various scenarios in this part of Serbia. We have used Gauss model for the evaluation of the gas matter dispersion and suspended particles, by determined values of the polluting matter emission and parameters related for the external environment. We have calculated surface concentrations of SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> and the suspended particles for different length from source of the emission.*

## 1. UVOD

U današnjem vremenu nivo industrijske proizvodnje u Srbiji je niži u poređenju sa nivoom koje imaju razvijene zemlje, ali je nažalost nivo zagađujućih materija prilično visok, prvenstveno zahvaljujući zastarjeloj tehnologiji, koja ne uključuje tehnologije prečišćavanja dimnih gasova i/ili upotrebe filtera visoke efikasnosti, kao i mnogih drugih faktora koji se tiču loše organizacije postrojenja i sirovina ili njihove neracionalne upotrebe. Termoelektrana i industrijska postrojenja (Obrenovac, Kostolac, Pančevo, Bor, Smederevo i dr.) utiču na kvalitet vazduha prvenstveno emisijom sumpor-dioksida, azotovih oksida, ugljen-monoksida, čađi i ostalih praškastih materija. Od svih zagađujućih materija sumporni oksidi predstavljaju vodeći faktor zagađenja pa se i koncentracija SO<sub>2</sub> u vazduhu uzima kao referentni parametar mjere zagađenja.

Termoelektrane sagorijevaju fosilna goriva i u dimnim gasovima se pored SO<sub>2</sub> emituju i gasovi poput CO, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, te sitne čestice čađi i pepela. Emisije SO<sub>2</sub> i NO<sub>x</sub> doprinose stvaranju kiselih kiša, tj. promjenama u hemijskom sastavu zemljišta i voda, sušenju šuma itd. Faktori koji doprinose zagađenju kod termoelektrana su visina dimnjaka koji emituje dimne gasove, izlazna temperatura, brzina i protok dimnog gasa, koncentracija štetnih materija u dimnom gasu i meteorološki i topografski parametri u okolini zagađivača. U ovom radu je primjenjen Gausov model disperzije dimnog gasa i to posebno SO<sub>2</sub> i NO<sub>x</sub>, a u zavisnosti od klasifikacije stabilnosti atmosfere prema Pasquill-Gifford-u<sup>1</sup> i topografskih karakteristika terena u okolini kostolačkog basena. Za dodatnu analizu korišćen je SCREEN3<sup>2</sup> model, pri različitim uslovima rada termoelektrane.

## 2. TE „KOSTOLAC“ I NJEN UTICAJ NA ŽIVOTNU SREDINU

Rudarsko-energetski basen Kostolac čine površinski kopovi lignita i dve termoelektrane. Rezerve ugljena u basenu Kostolac su na trećem mjestu po njihovoj količini (poslije Kolubarskog i Kosovskog basena), ali na drugom mjestu po intenzitetu eksploatacije, sa preko 9 miliona tona ugljena godišnje. Najveći dio eksploatacije lignita odlazi na termoelektrane Kostolac A i Kostolac B. TE Kostolac A se nalazi u naselju Kostolac, čine je dva bloka A<sub>1</sub> i A<sub>2</sub>, ukupne instalisane snage 381 MW (100+281 MW). TE Kostolac B se nalazi u blizini istoimenog sela, gdje se nalazi i površinski kop lignita. Ova termoelektrana se sastoji od dva bloka B<sub>1</sub> i B<sub>2</sub>, ukupne snage 2x348,5 MW.

Uticaj ovih industrijskih objekata na životnu sredinu čine sljedeće aktivnosti: sagorijevanje uglja u kotlovima termoelektrana, stvaranje prašine sa površinskih kopova Drmno, Ćirkovac i Klenovik, te deponovanje šljake i pepela. Kotlovi sagorijevaju godišnje oko 9 miliona tona lignita i deponuje se više od 2 miliona pepela. Najveće promjene ekosistema uzrokuju emisije dimnih gasova, praškastih materija i proizvodnja pepela i šljake. Svi ovi faktori imaju veoma izražen uticaj na zagađenja vazduha, podzemnih i površinskih voda i degradaciju zemljišta. Na aerozagađenje najveći uticaj imaju dimni gasovi i pepeo. Dimni gas je produkt sagorijevanja goriva (ugljena) i predstavlja smjesu sumpor-dioksida, azotnih oksida, ugljen monoksida, fluorida i hlorida, čije koncentracije veoma zavise od vrste ugljena. Pored ovoga, dimni gas sadrži i čvrste čestice, kao što si čađ i pepeo, kao posljedica nepotpunog sagorijevanja goriva. Najzastupljenije jedinjenje u dimnom gasu čini sumpor-dioksid (oko 97%). Emisija ovog zagađivača u 2011. godini je iznosila oko 6000 mg/Nm<sup>3</sup> po svakom bloku, dok je dozvoljena granična vrijednost propisana EU normama 400 mg/Nm<sup>3</sup> [1].

<sup>1</sup> Kao što će se kasnije vidjeti u radu, ova klasifikacija podrazumijeva 6 klasa stabilnosti vremenskih prilika, počevši od A-klase (veoma nestabilno vrijeme) do F-klase (veoma stabilno vrijeme).

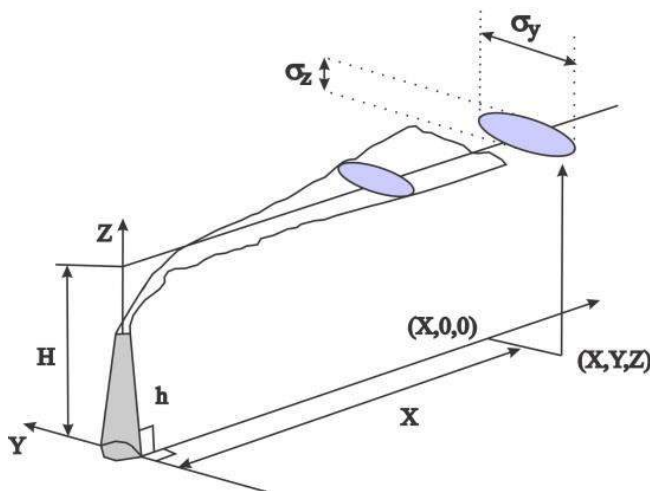
<sup>2</sup> Ovaj model je definisam od strane američke EPA (Environmental Protection Agency).

### 3. SIMULACIONI MODEL PRORAČUNA KONCENTRACIJE I ŠIRENJA AEROZAGAĐENJA

Ovdje će biti primjenjen Gausov statistički model za procjenu prizemne koncentracije gasovitih materija, kada su poznate vrijednosti emisija gasovitih materija, kao i parametri vezani za spoljašnju sredinu za blokove B<sub>1</sub> i B<sub>2</sub> TE Kostolac B. Osnovu modela čini pretpostavka da se iz tačkastog izvora emituje dimni stub sa simetričnom raspodjelom koncentracije čestica u odnosu na osu dimnog stuba. Osnovna jednačina Gausovog statističkog modela ima oblik [2]:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y(x)\sigma_z(x)\bar{u}} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2(x)}\right) \left\{ \exp\left[-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2(x)}\right] + \exp\left[-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2(x)}\right] \right\}, \quad \dots (1)$$

gdje su:  $Q$ -maseni protok;  $C$ -koncentracija primjesa;  $\sigma_y(x)$  i  $\sigma_z(x)$ -dispersije difuzije u pravcu odgovarajućih osa, koje zavise od meteoroloških uslova i rastojanja koje čestica pređe od izvora do tačke sa koordinatom  $x$ ;  $\bar{u}$ -srednja brzina vjetra na nivou mjerenja;  $H$ -visina emitera (dimnjaka). Smjer ose  $OX$  poklapa se sa smjerom vektora vjetra.



Na Sl. 1 se vide horizontalna i vertikalna dispersija raspodjele primjesa, za koje važe sljedeće relacije:

$$\sigma_y = Ax^a; \sigma_z = Bx^b, \quad \dots (2)$$

gdje su  $A$ ,  $B$ ,  $a$  i  $b$  koeficijenti koji zavise od meteo-stabilnosti atmosfere i reljefa površine koji se određuju eksperimentalno. Atmosferska stabilnost se određuje preko Pasquill-Gifford sistema klasifikacije, koji razlikuje 6 klasa stabilnosti: od A (veoma nestabilna) do F (veoma stabilna). Kod analize uticaja TE Kostolac na kvalitet vazduha (srednje jednočasovne koncentracije), korišten je softver Screen View 3.5.0 kompanije Lakes Enviromental Software. Za proračun sumpornih oksida i praškastih materija korištene su sljedeći ulazni parametri (Tabela 1): visina i

Slika 1. Dispersija dimnog stuba iz dimnjaka [3]

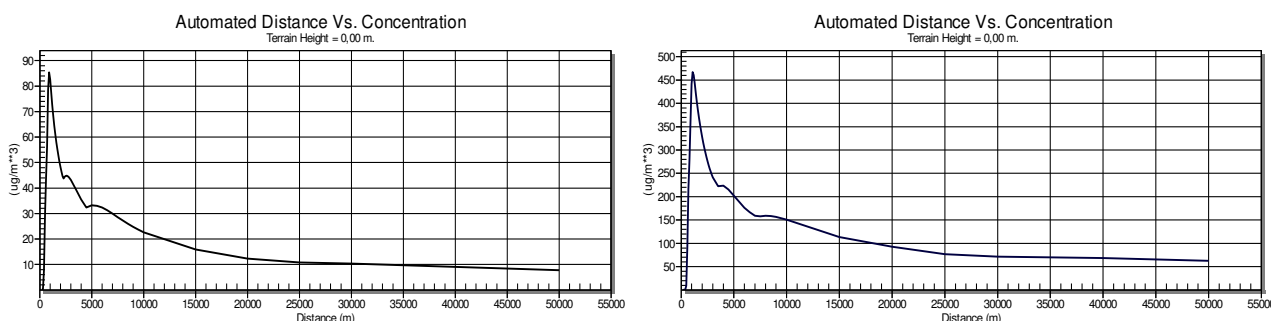
unutrašnji prečnik dimnjaka; maseni protok, brzina i temperatura dimnih gasova na izlazu dimnjaka; topografske karakteristike terena oko termoelektrana; stabilnost atmosfere i brzina vjetra. Na osnovu klimatoloških faktora za period 1990-2009. odabran je decembar 2008., te na osnovu podataka izračunata srednja mjesečna temperatura vazduha 3,3<sup>0</sup>C. U tom mjesecu je preovlađivala klasa stabilnosti D i F. Veliki dio analizirane oblasti se odlikuje prilično ravnom topografskom površinom, koja ostaje ravna i na udaljenosti većoj od 20 km, što dovodi do zaključka da reljef terena nema značajan uticaj na distribuciju zagađujućih materija. Brzina i pravac vjetra, kako će pokazati rezultati, imaju mnogo značajniji uticaj na distribuciju zagađenja od strane TE Kostolac.

Tabela 1. Parametri proizvodnje u TE Kostolac, za decembar 2008 [4]

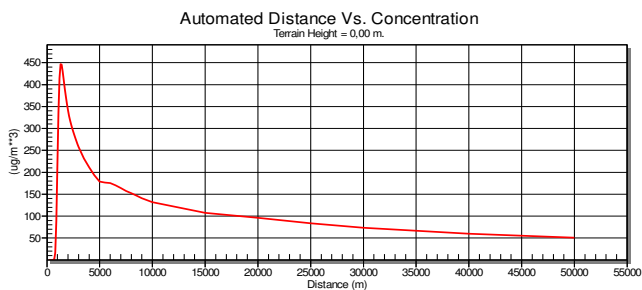
Parametar	Kostolac A1	Kostolac A2	Kostolac B
Visina dimnjaka [m]	105	110	250
Unutrašnji prečnik dimnjaka na izlazu [m]	5	6,02	9,5
Temperatura dimnih gasova na izlazu [ $^{\circ}$ C]	190	200	170
Maseni protok SO <sub>x</sub> [g/s]	24,4	403	1410,8
Maseni protok NO <sub>x</sub> [g/s]	16,6	33,1	116
Maseni protok PM [g/s]	24,4	48,8	170,8

#### 4. REZULTATI I ANALIZA MODELA

Rezultati koji su dobijeni su analizirani po grupama, kako bi se jasno utvrdili oni parametri koji dovode do značajnih promjena.



Slika 2. Koncentracija SO<sub>x</sub> na površini u zavisnosti od udaljenosti od emitera za TE Kostolac A<sub>1</sub> (lijevo) i A<sub>2</sub> (desno)

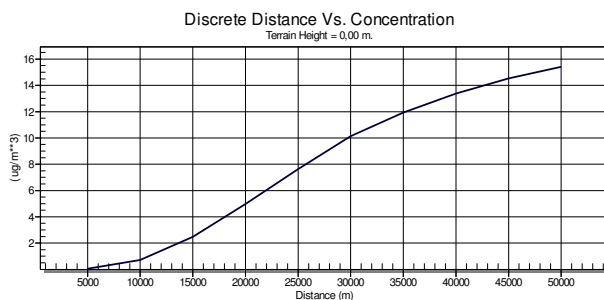
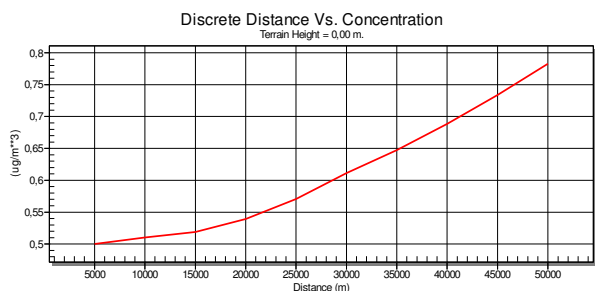


Slika 3. Koncentracija SO<sub>x</sub> na površini u zavisnosti od udaljenosti od emitera za TE Kostolac B

Sa Sl. 2 i Sl. 3 se mogu očitati maksimalne koncentracije SO<sub>x</sub>, koje su u slučaju A2 i B veće od maksimalno dozvoljene granične koncentracije od 150 µg/m<sup>3</sup> na udaljenostima i do 10 km, u pravcu dominantnog vjetrova. Treba napomenuti da su dominantni vjetrovi sa istoka i jugoistoka, što navodi na zaključak da su ovom emisijom primarno ugroženi gradovi Požarevac, Smederevo i Pančevo, sa napomenom da su posljednja dva sa već postojećim stepenom zagađenja.

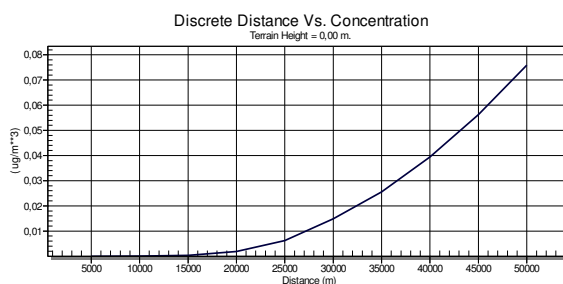
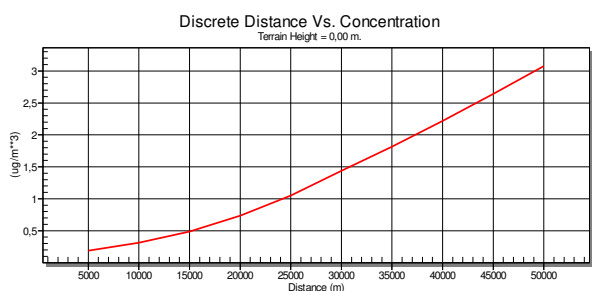
Iako emisija SO<sub>x</sub> emitovanog sa A1 ne prelazi granične koncentracije, ukupna koncentracija je jednaka zbiru koncentracija sa svih emitera, što navodi na zaključak da su koncentracije SO<sub>x</sub> ispod graničnih tek na udaljenostima većim od 35 km. Kod azotnih oksida oblik raspodjela zavisnosti koncentracija od udaljenosti je sličan kao i za SO<sub>x</sub>, ali je pojedinačna i zbirna koncentracija azotnih oksida ispod granične vrijednosti od 85 µg/m<sup>3</sup>.

U zavisnosti od klasa vremenske stabilnosti i brzine vjetrova dobijeni su rezultati prikazani na slikama 4 i 5.



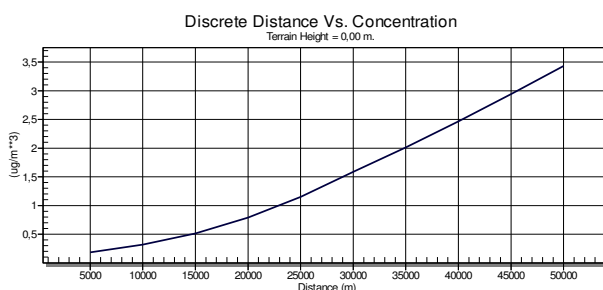
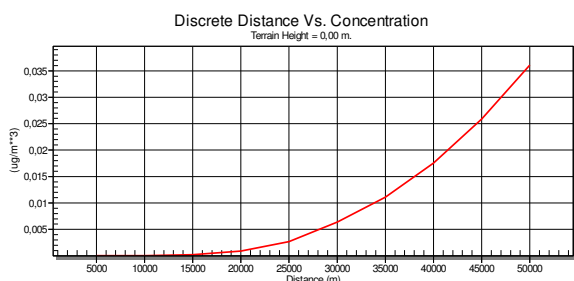
Slika 4. Koncentracija SO<sub>x</sub> na površini za klasu D na temperaturi 3,3 0C i brzinu vjetra od 1 m/s (lijevo) i 5 m/s (desno)

Treba primjetiti da koncentracija SO<sub>x</sub> rastu sa povećanjem brzine vjetra, što nije u saglasnosti sa jednačinom 1, ali treba naglasiti da je ovaj rezultat posljedica činjenice da veće brzine vjetra dovode do erozije površine, te podizanja i nošenja sitnih frakcija pepela koji je neadekvatno uskladišten – što dovodi do nekontrolisanih sekundarnih emisija. Mjerenja su potvrdila najveća prekoračenja emisije u mjestima u blizini deponija pepela (za TE Kostolac to su mjesta Kostolac i Stari Kostolac, a kod TE Kostolac B najveći zagađivači su površinski izvori otkrivke, odlagalište krečnjaka, pepela i gipsa).



Slika 5. Koncentracija SO<sub>x</sub> na površini za klasu F na temperaturi 3,3 0C i brzinu vjetra od 1 m/s (lijevo) i 5 m/s (desno)

Poredeći slike 4 i 5, vidljivo je da su koncentracije aerozagađenja, pod istim uslovima, veće za klasu stabilnosti D (neutralno) od klase F (veoma stabilno). Uticaj temperature vazduha je prikazan na slici 6.



Slika 6. Koncentracija SO<sub>x</sub> na površini za klasu D na temperaturi 3,3 0C (lijevo) i 11,3 0C (desno)

Uočava se da se povećanjem temperature povećava i aerozagađenje. Ovo se objašnjava povećanjem koncentracije ozona nastalog usljed fotohemijskog efekta.

Izračunavanje ukupne koncentracije aerozagađenja je kompleksan problem, jer se radi o multipolnom zagađenju – u našem slučaju izučavane su grupe SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, te praškastih i suspendovanih čestica. Ovaj problem je izučavao Vnukov [1] izračunavanjem redukovanih koeficijenata (Tabela 2):

$$K_i = \frac{C_i}{GV_i}; i = 1, 2, 3 \quad \dots (3)$$

gdje su C<sub>i</sub> koncentracije pojedinačnih grupa, a GV<sub>i</sub> granične vrijednosti pojedinačne komponente. Rezultujuće aerozagađenje pri simultanom dejstvu više komponenti određuje se pomoću kompleksnog koeficijenta:

$$P = \sqrt{\sum_{i=1}^3 K_i^2} \quad \dots(4)$$

Tabela 2. Raspodjela koncentracija različitih komponenti u zavisnosti od rastojanja od izvora

Rastojanje [km]	Koncentracija C <sub>1</sub> , (SO <sub>x</sub> ) [µg/m <sup>3</sup> ]	Koncentracija C <sub>2</sub> , (NO <sub>x</sub> ) [µg/m <sup>3</sup> ]	Koncentracija C <sub>3</sub> , (PM) [µg/m <sup>3</sup> ]	K <sub>1</sub> =C <sub>1</sub> /GV <sub>1</sub>	K <sub>2</sub> =C <sub>2</sub> /GV <sub>2</sub>	K <sub>3</sub> =C <sub>3</sub> /GV <sub>3</sub>	P
1	687,67	52,64	106,8	4,58	0,62	2,14	5,1
3	523,88	41,21	74,46	3,49	0,48	1,49	3,83
5	401,99	31,68	56,17	2,68	0,37	1,12	2,93
7	341,05	26,68	48,61	2,27	0,31	0,97	2,49
9	312,29	24,27	43,41	2,08	0,28	0,87	2,27
15	231,68	18,67	32,78	1,54	0,22	0,66	1,69
20	193,88	15,51	26,84	1,29	0,18	0,54	1,41
25	164,75	13,28	22,9	1,1	0,16	0,46	1,2
30	150,08	12,07	20,93	1	0,14	0,42	1,09

Vnukov klasifikuje nivoe aerozagađenja na pet klasa [1], od I (ili dozvoljenog) do V (vrlo jakog) zagađenja, u zavisnosti od broja zagađivača, pri čemu kompleksni koeficijent uzima različite vrijednosti, koje su date u Tabeli 3.

Tabela 3. Vrijednosti kompleksne veličine P u zavisnosti od broja zagađivača i nivoa zagađenja

Nivo zagađenja atmosfere	Broj zagađivača			
	2-3	4-9	10-20	Preko 20
I dozvoljen	2	3	4	5
II slab	2,1-4	3,1-6	4,1-8	5,1-10
III umjeren	4,1-8	6,1-12	8,1-16	10,1-20
IV jak	8,1-16	12,1-24	16,1-32	20,1-40
V vrlo jak	>16	>24	>32	>40

Kada uporedimo vrijednosti kompleksnog broja P iz Tabele 2 zaključujemo da je na udaljenosti od 3 km nivo zagađenja umjeren, na udaljenostima 5-10 km slab, te dozvoljen na udaljenostima >10 km. Ipak, treba napomenuti da su ovdje razmatrane „samo“ tri grupe zagađivača, među kojima je najviše zastupljena grupa sumpornih oksida. Ono što nije razmatrano, a svakako doprinosi zagađenju, jesu ostale faze u proizvodnji uglja i električne energije. U njih treba ubrojati i procese formiranja otkrivki površinskih kopova, mljevenje

ugljena, produkcije i skladištenja pepela. Uzimajući i ove faktore u obzir postaje očigledno da je problem zagađenja iz TE Kostolac veoma složen.

## 5. ZAKLJUČAK

U radu je simulirana emisija 3 grupe zagađivačkih elemenata u sklopu TE Kostolac, koristeći Gaussov model i meteorološke podatke vezane za ovaj dio Srbije. Rezultati ovih simulacija dovode do sljedećih zaključaka:

- Emisija SO<sub>2</sub> mora da se smanji za više od 94% kako bi se dostigle vrijednosti od 400 mg/Nm<sup>3</sup>, pri punom opterećenju blokova i pri sagorijevanju ugljena najnižeg kvaliteta. Najveći uticaj na zagađenje je u okolini TE Kostolac na udaljenosti 15 km od izvora u pravcu dominantnog vjetra [7]. Ovako velika količina emisije SO<sub>2</sub> je posljedica činjenice da su na postojećim dimnjacima ugrađeni elektrofilteri za prečišćavanje dimnih gasova od čestica, ali ne i od sumpornih oksida.
- Trenutne emisije azotnih oksida ne prelaze zakonom propisane granične vrijednosti, ali postoji tendencija da se trenutna granica od dozvoljenih 400 mg/Nm<sup>3</sup> smanji na 200 mg/Nm<sup>3</sup>, te se u tom smislu moraju tražiti i nova rješenja za smanjenje emisije azotnih oksida.
- Utvrđena je direktno proporcionalna zavisnosti nivoa zagađenja od klasa atmosferskih stabilnosti, brzina vjetra i temperature vazduha. Nivo zagađenja raste sa temperaturom i brzinom vjetra, te opada sa porastom vremenskih stabilnosti. Uticaj reljefa zbog gotovo ravničarske topografije terena nije značajan na nivo zagađenja.

Energetske potrebe zasjenjuju velike opasnosti koje sa sobom nose rudarsko-energetska postrojenja poput TE Kostolac. Međutim, postoje tehnološka rješenja poput sistema za odsumporavanje, pri čemu se u ovim tehnološkim procesima dodatno dobija i sirovina za proizvodnju gipsa. Ne treba zaboraviti ni prirodne tj. zelene tehnologije, koje obuhataju zelene šumske zasade u blizini zagađivača, kao i zaštitne zelene pojase pored stambenih naselja.

**Zahvalnost:** Ovaj rad je dijelom financiran od strane Ministarstva za obrazovanje, nauku i tehnologiju Republike Srbije (Grant No.: ON-171039 i TR-34019), kao i Ministarstva nauke i tehnologije Republike Srpske (br. 19/6-020/961-16/15).

## 6. REFERENCE

- [1] Izvještaj Službe za upravljanje zaštitom životne sredine Privrednog društva termoeletrane i kopovi Kostolac,
- [2] Laziridis, M.: *First principles of Meteorology and Air Pollutant*, pp. 201-232, Springer, New York, 2011.,
- [3] Jaćimovski S., Miladinović S., Radovanović R., Pijazi V.: Јаћимовски С., Миладиновић С., Радовановић Р., Илијази В.: *Distribution of the concentration of sulphur dioxide into the atmosphere from point source*, International conference Ecology of urban areas, Tehnički fakultet „Mihajlo Pupin“, Univerzitet u Novom Sadu, pp. 50-58, 2013.,
- [4] Đorđević-Miloradović J., Miloradović D., Savić N.: *Rekultivacija i ozelenjavanje deponija, pepelišta i jalovišta u Kostolcu*, RIO Kostolac, pp.72-84, 2012.,
- [5] Внуков, А. К.: *Защита атмосферы от выбросов энергообъектов* Справочник, Энергоатомиздат, Москва, pp. 134-138, 1992.,
- [6] Jovović, A. i dr.: *Studija o proceni uticaja na životnu sredinu: Odsumporavanje dimnih gasova TE Kostolac B*, Beograd, 2010.