



**Univerzitet u Beogradu**  
**Elektrotehnički fakultet**  
*Energetski odsek*

*Željko Đurišić*

**Obnovljivi izvori energije**  
**-ekološki aspekti proizvodnje električne energije-**

Beograd, 2013.

**Primer 1** Ako se pretpostavi da je Zemlja crno telo sa prosečnom temperaturom površine od 15°C i površinom od  $5.1 \cdot 10^{14} \text{ m}^2$ . Proračunati snagu hlađenja zemlje i talasnu dužinu na kojoj se emituje najjača snaga. Uporedite talasne dužine maksimalne snage upadnog (Solarnog) zračenja i maksimalnog zračenja Zemlje. Pretpostaviti da je Sunce apsolutno crno telo na temperaturi 5800 K.

**Resenje:**

Svaki objekat emituje energiju u vidu elektromagnetskog zračenja čija je snaga funkcija njegove temperature. Uobičajeni način da se opiše snaga radijacije objekata je da se uporedi sa teoretskom apstrakcijom nazvanom *crno telo*. Crno telo se definiše kao savršeni emiter i savršeni absorber. Kao savršeni emiter ono isijava više energije po jedinici površine od bilo kog realnog objekta iste temperature. Kao savršeni absorber ono apsorbira svu redijaciju koja padne na njega (nema refleksije i transmisije kroz njega). Crno telo emituje zračenje na svim talasnim dužinama. Gustina snage zračenja na određenoj talasnoj dužini zavisi od temperature tela, kao što je opisano *Plankovim zakonom*:

$$E_{\lambda} = \frac{3.74 \times 10^8}{\lambda^5 \left[ \exp\left(\frac{14.400}{\lambda T}\right) - 1 \right]}$$

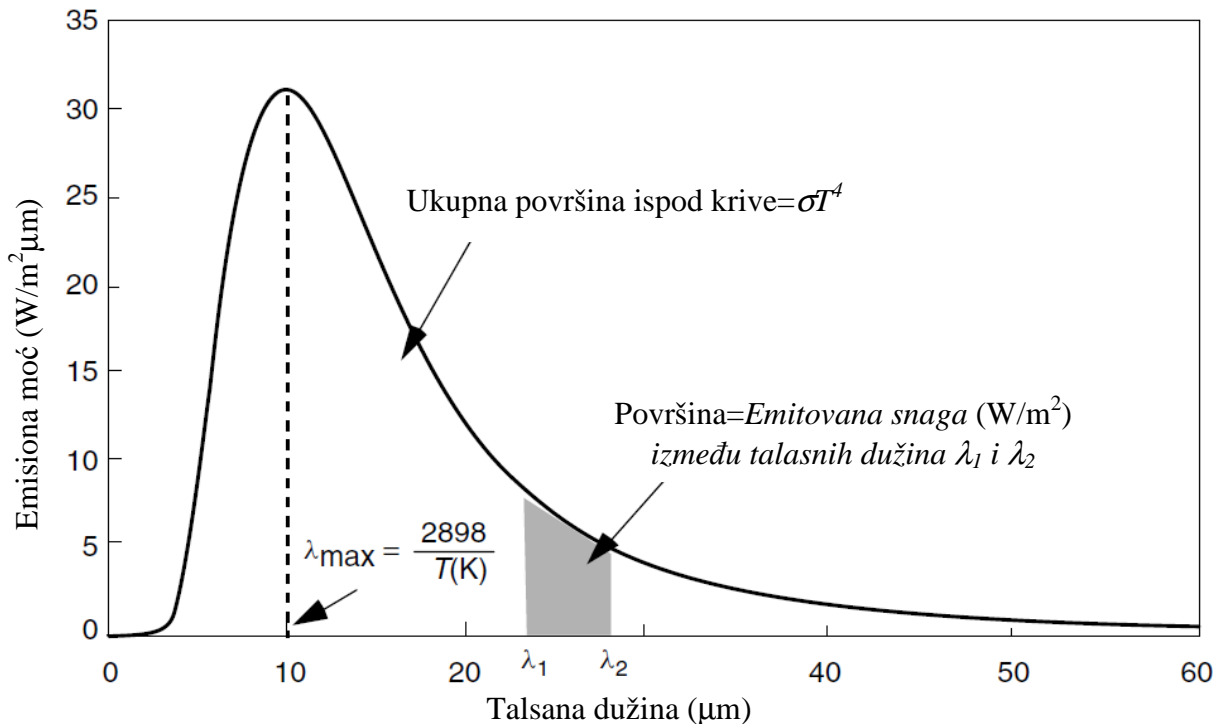
gde su:

$E_{\lambda}$  - emisiona moć po jedinici površine crnog tela ( $\text{W/m}^2 \mu\text{m}$ ),

$T$  - apsolutna temperatura tela (K),

$\lambda$  - talasna dužina ( $\mu\text{m}$ ).

Ako pretpostavimo da je Zemlja apsolutno crno telo temperature 288 K (15°C) shodno Plankovom zakonu dobija se emisioni sprektar (Plankova kriva) prikazan na slici 1.1.



Slika 1.1 Emisiona moć po jedinici površine crnog tela temperature 288 K.

Površina ispod Plankove krive između bilo koje dve talasne dužine je snaga emitovana između tih talasnih dužina. Ukupna površina ograničena krivom i apscisnom osom odgovara ukupnoj snazi zračenja. Taj rezultat je zgodno predstavljen *Stefan-Bolcmanovim zakonom radijacije*:

$$E = A\sigma T^4,$$

gde su:

- $E$  - ukupna snaga zračenja crnog tela (W),
- $\sigma$  - Stefan-Bolcmanova konstanta ( $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ ),
- $T$  - apsolutna temperatura crnog tela (K),
- $A$  - je površina crnog tela ( $\text{m}^2$ ).

Talasna dužina pri kojoj se ima maksimalna snaga zračenja crnog tela je definisana *Vien-ovim zakonom pomeranja*:

$$\lambda_{\max} (\mu\text{m}) = \frac{2898}{T(\text{K})}.$$

Uz date pretpostavke, koristeći Stefan-Bolcmanovim zakonom radijacije, može se proračunati ukupna snaga zračenja (hlađenja) Zemlje:

$$E = \sigma AT^4 = (5.67 \times 10^{-8} \text{ W / m}^2\text{K}^4) \times (5.1 \times 10^{14} \text{ m}^2) \times (15 + 273 \text{ K})^4 = 2.0 \times 10^{17} \text{ W}$$

Talasna dužina na kojoj se emituje najveća snaga zračenja Zemlje je:

$$\lambda_{\max} (\text{zemlje}) = \frac{2898}{T(\text{K})} = \frac{2898}{288} = 10.1 \mu\text{m}$$

Za Sunce temperature 5800 K najveća snaga zračenja je,

$$\lambda_{\max} (\text{sunca}) = \frac{2898}{5800} = 0.5 \mu\text{m}$$

Zemljina atmosfera se ponaša kao anizotropni filter u pogledu propuštanja toplotnog zračenja. Slabije propušta dugotalasna zračenja, koje emituje zemljina površina, od kratkotalasnog zračenja koje dospeva od Sunca. Ova anizotropna svojstva atmosfere su odgovorana za efekat staklene bašte.

**Primer 2.** Na jednoj lokaciji u Vojvodini planirana je izgradnja dve vetroelektrane ukupne instalisane snage 300 MW. Na osnovu mjerenja brzina vetra u regionu proračunato (procenjeno) je da će vetroelektrane raditi sa prosečnim godišnjim faktorom iskorišćenja kapaciteta od 27,15 %. Proceniti godišnju uštedu u emisiji gasova staklene bašte koja se postiže proizvodnjom električne energije u analiziranim vetroelektranama.

### Rešenje:

Jedan od osnovnih motiva za nagli razvoj obnovljivih izvora energije je njihov relativno mali negativan uticaj na životnu sredinu u poređenju sa konvencionalnim elektranama. Glavni negativni uticaji proizvodnje električne energije se kvantifikuju kroz emisiju štetnih gasova u atmosferu pri proizvodnji svakog kWh električne energije. U tabeli 2.1 je dat pregled prosečne emisije neradioaktivnih gasova pri proizvodnji električne energije iz različitih izvora. Navedene vrednosti predstavljaju ekvivalentne emisije u koje su uključene i emisije koje su prouzrokovane proizvodnjom elemenata elektrane i njihovom montažom.

Tabela 2.1. Tipična emisija neradioaktivnih gasova pri proizvodnji električne energije iz različitih izvora posmatranom na nivou životnog veka elektrane

Tip elektrane	CO <sub>2</sub> (mg/kWh)	NO <sub>x</sub> (mg/kWh)	SO <sub>2</sub> (mg/kWh)	Čvrste čestice (čad) (mg/kWh)
Ugalj/lignit	986000	2986	16511	347
Nafta	1131178	5253	81590	128
Natural gas turbine	560000	1477	152	34
Natural gas combined	450000	756	152	6
Nuklearna	21435	51	27	2
Hidro	22696	23	33	5
Vetro	17652	32	54	20
Solarna (fotonaponska)	49174	178	257	101
Biomasa	58000	1325	76	269
Geotermalna	18913	280	20	0

Glavni negativni uticaji proizvodnje električne energije, odnosno emisije štetnoj gasova, pri radu elektrana su:

- Globalno zagrevanje zbog efekta staklene bašte
- Pojava kiselih kiša
- Negativan uticaj na kvalitet voda i ekosistem.

Svaki od navedenih štetnih gasova koji se emituju u atmosferu u manjoj ili većoj meri uzrokuje navedene negativne uticaje na životnu sredinu. Uticaj pojedinih gasova na određenu kategoriju zagađenja životne sredine se kvantifikuje preko odgovarajućih koeficijenata. U tabeli 2.2 navedene su vrednosti tih koeficijenata (*Characterization factor U*) za osnovne emisije gasove koji su od interesa za ovu analizu.

Kvantifikacija uticaja proizvodnje električne energije na određenu kategoriju ugrožavanja životne sredine se posmatra kroz utvrđivanje nivoa ekvivalentne emisije određenog referentnog gasa (CO<sub>2</sub> je referentni gas za globalno zagrevanje, SO<sub>2</sub> za stvaranje kiselih kiša i PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> za ugrožavanje voda i ekosistema).

Tabela 2.2. Faktori uticaja određenih emisionih gasova na osnovne kategorije negativnog uticaja na životnu sredinu

<i>Kategorije uticaja</i>	<i>Inventory parameter</i>	<i>Characterization faktor U</i>	<i>Reference</i>	<i>Value U (kg<sub>material</sub>/kg<sub>reference</sub>)</i>
<b>Globalno zagrevanje</b>	CO <sub>2</sub>	<i>Global warming potential (GWP)</i>	CO <sub>2</sub> equiv.	1
	CH <sub>4</sub>		CO <sub>2</sub> equiv.	21
	N <sub>2</sub> O		CO <sub>2</sub> equiv.	310
<b>Kisele kiše</b>	SO <sub>2</sub>	<i>Acidification potential (AP)</i>	SO <sub>2</sub> equiv.	1
	NO <sub>x</sub>		SO <sub>2</sub> equiv.	0,7
	NH <sub>3</sub>		SO <sub>2</sub> equiv.	1,88
	HCl		SO <sub>2</sub> equiv.	0,88
<b>Kvalitet voda i ekosistem</b>	NO <sub>x</sub>	<i>Eutrophication potencial (EP)</i>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> equiv.	0,13
	NH <sub>3</sub>		PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> equiv.	0,33

Za analiziranu vetroelektranu može se proceniti ukupna godišnja proizvodnja električne energije:

$$W_e = P_n \cdot CF \cdot 8760 = 300 \cdot 0,2715 \cdot 8760 = 713,388 \text{ GWh/god.}$$

Imajući u vidu podatke date u tabelama 2.1 i 2.2 i utvrđenu godišnju proizvodnju električne energije perspektivnih vetroelektrana, mogu se proceniti ekvivalentne emisije referentnih gasova.

Ukupna godišnja emisija ekvivalentnog CO<sub>2</sub> pri proizvodnji električne energije u analiziranim vetroelektranama je:

$$MCO_{2e}^{VE} = W \cdot [mCO_2 + GWP_{NO_x} \cdot mNO_x] = 713,388 \cdot (17652 + 310 \cdot 32) \approx 19700tCO_{2e}/god.$$

Ukupna godišnja emisija ekvivalentnog SO<sub>2</sub> pri proizvodnji električne energije u analiziranim vetroelektranama je:

$$MSO_{2e}^{VE} = W \cdot [mSO_2 + AP_{NO_x} \cdot mNO_x] = 713,388 \cdot (54 + 0,7 \cdot 32) \approx 54,5tSO_{2e}/god..$$

Ukupna godišnja emisija ekvivalentnog PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> pri proizvodnji električne energije pomoću analiziranog vetroagregata je:

$$MPO_{4e}^{3-VE} = W \cdot EP_{NO_x} \cdot mNO_x = 713,388 \cdot 0,13 \cdot 32 \approx 3tPO_{4e}^{3-}/god.$$

Ekološka valorizacija projekta vetroelektrane se izražava kroz uštedu u emisiji analiziranih referentnih gasova u odnosu na emisiju tih gasova pri proizvodnji iste količine električne energije u termoelektrani na lignit (TE).

Ukupna godišnja emisija ekvivalentnog CO<sub>2</sub> pri proizvodnji električne energije u ekvivalentnoj TE je:

$$MCO_{2e}^{TE} = W \cdot [mCO_2 + GWP_{NO_x} \cdot mNO_x] = 713,388 \cdot (986000 + 310 \cdot 2986) \approx 1364000 tCO_{2e} / god$$

Ukupna godišnja emisija ekvivalentnog SO<sub>2</sub> pri proizvodnji električne energije u ekvivalentnoj termoelektrani je:

$$MSO_{2e}^{TE} = W \cdot [mSO_2 + AP_{NO_x} \cdot mNO_x] = 713,388 \cdot (16511 + 0,7 \cdot 2986) \approx 13600 tSO_{2e} / god.$$

Ukupna godišnja emisija ekvivalentnog PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> pri proizvodnji električne energije u ekvivalentnoj termoelektrani je:

$$MPO_{4e}^{3- TE} = W \cdot EP_{NO_x} \cdot mNO_x = 713,388 \cdot 0,13 \cdot 2986 \approx 280 tPO_{4e}^{3-} / god.$$

Na osnovu prethodnih proračuna mogu se utvrditi uštede u emisiji pojedinih gasova pri radu analiziranog vetroagregata:

Ušteda u emisiji CO<sub>2</sub>:

$$MCO_{2e}^{VE} - MCO_{2e}^{TE} = 1344300 tCO_{2e} / god$$

Ušteda u emisiji SO<sub>2</sub>:

$$MSO_{2e}^{VE} - MSO_{2e}^{TE} = 13545,5 tSO_{2e} / god$$

Ušteda u emisiji PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>:

$$MPO_{4e}^{3- VE} - MPO_{4e}^{3- TE} = 277 tPO_{4e}^{3-} / god$$