

# Određivanje Linke-ovog faktora mutnoće vazduha za područje Beograda

Milan Jović, Milan Ivezić

Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet  
Beograd, Srbija

Visoka škola elektrotehnike i računarstva strukovnih studija  
Beograd, Srbija  
milan.jovic@viser.edu.rs, milan.ivezic@viser.edu.rs

Jovan Mikulović

Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet  
Beograd, Srbija  
mikulovic@etf.rs

*Sadržaj*— Atmosferska mutnoća je važan parametar za ocenu zagađenosti vazduha u lokalnim sredinama, takođe je i glavni parametar koji određuje slabljenje Sunčevog zračenja koje dospeva na Zemljinu površinu u uslovima vedrog neba. Za ocenu atmosferske mutnoće u ovom radu korišćen je model za izračunavanje Linke-ovog faktora mutnoće koje se zasniva na jednogodišnjim merenjima horizontalne iradijacije na području Beograda. Dobijeni rezultati su upoređeni sa preporučenim vrednostima za Linke-ov faktor mutnoće pod tipičnim atmosferskim uslovima. Maksimalna vrednost Linke-ovog faktora ostvarena je juna meseca razmatrane godine, dok je minimalna ostvarena decembra meseca.

*Ključne reči* - Linke-ov faktor mutnoće; mutnoća atmosfere; Sunčeva iradijacija; fotonaponski sistemi;

## I. UVOD

Fotonaponski i termalni sistemi na bazi Sunčeve energije se najčešće projektuju uvažavajući njihove performanse pri standardnim uslovima ispitivanja, bez uzimanja u obzir stanja lokalne atmosfere. Razlog je česta nedostupnost atmosferskih podataka o određenoj lokaciji za koju se sistem projektuje. Istraživanje efikasnosti solarnih ćelija/modula u različitim uslovima atmosferske mutnoće i klime je osnova za optimizaciju njihovih performansi, jer porast mutnoće smanjuje izlaznu struju solarnih ćelija [1].

Slabljenje Sunčeve iradijacije je veoma zavisno od stanja neba, vedrine atmosfere i sastava gasova. U uslovima čiste i suve atmosfere, Sunčeva iradijacija je oslabljena stalnim atmosferskim činiocima, molekulima vazduha, gasova i ozona, čiji je sadržaj skoro nepromenljiv. Dva dodatna procesa slabljenja Sunčeve iradijacije posledica su apsorpcije od strane vodene pare i rasejanja zbog čestica aerosoli koje postoje u realnoj atmosferi. Dodatno slabljenje prouzrokovano ovim procesima poznato je kao mutnoća atmosfere.

Kompleksnost činilaca uključenih u proces slabljenja prouzrokuje teškoće u izračunavanju Sunčeve iradijacije koja dostiže Zemljinu površinu, naročito u određenim klimatskim situacijama.

Proučavanje atmosferske mutnoće bitno je za meteorologiju, klimatologiju kao i za nadgledanje zagađenosti atmosfere. Vrednost Sunčeve iradijacije koja dospeva na

Zemljinu površinu neophodan je podatak pri dimenzionisanju fotonaponskih sistema [2]. Faktor mutnoće je ispitan u želji da se iskoristi za procenu Sunčevog zračenja koje na području Beograda dospeva na horizontalnu površinu Zemlje. U okviru ovoga rada, za izračunavanje Linke-ovog faktora mutnoće korišćeni su podaci o Sunčevom zračenju dobijeni merenjem na teritoriji grada Beograda.

Klimatski podaci kao što su temperatura vazduha, vlažnost, jačina i pravac vetra, kao i oblačnost su najčešće dostupniji od podataka o Sunčevom zračenju. Potreba za podacima o zračenju pokriva čitave oblasti koje dovode do razvoja modela zračenja koji omogućavaju izračunavanje parametara zračenja sa određenim prihvatljivim greškama. Razvoj ovih modela usko je povezan sa korišćenjem Sunčeve energije za dobijanje toplotne i električne energije [3].

## II. KLIMATSKE KARAKTERISTIKE BEOGRADA I METEOROLOŠKI PODACI

Klima Beograda je umereno kontinentalna, sa četiri godišnja doba. Jesen je duža od proleća, sa dužim sunčanim i toplim periodima tzv. miholjsko leto. Zima nije tako oštra, sa u proseku, 21 danom sa temperaturom ispod nule. Januar je najhladniji sa prosečnom temperaturom 0.10°C. Proleće je kratko i kišovito. Leto naglo dolazi.

Prosečna godišnja temperatura vazduha je 11.70°C. Karakteristika beogradske klime je i košava, jugoistočni i istočni vetar, koji donosi vedro i suvo vreme. Najčešće duva u jesen i zimu, u intervalima od 2 do 3 dana. Prosečna brzina košave je 25-43 km/h, a u pojedinim udarima može dostići brzinu do 130 km/h. Košava je najveći prečišćivač vazduha Beograda.

Na Beograd i okolinu, godišnje padne, prosečno 669.5 mm padavina. Najveću količinu padavina imaju maj i jun. Prosečno trajanje sunčevog sjaja je 2096 sati. Najveća insolacija, oko 10 časova dnevno, je u julu i avgustu, dok je najveća oblačnost u decembru i januaru, kada sunce sija u proseku, 2 do 2.3 sata dnevno. Prosečan broj dana sa padanjem snega je 27, dužina zadržavanja snežnog pokrivača je 30 do 44 dana, a debljina iznosi 14 do 25 cm. Srednji atmosferski pritisak u Beogradu je 1001 mb, a srednja relativna vlažnost vazduha je 69.5% [4].

#### IV. PRORAČUN I REZULTATI

Meteorološki podaci izmereni su na teritoriji grada Beograda, koji se nalazi na 116.75 m nadmorske visine, 44° 49' 14" severne geografske širine i 20° 27' 44" istočne geografske dužine [5].

Podaci koji su sakupljeni za širi region Beograda tokom 2009. godine su:

- Brzine vetra su izmerene na visinama 60 m, 50 m, 40 m i 10 m
- Smer vetra
- Temperatura vazduha
- Ukupna horizontalna iradijacija

Navedena merenja obavljena su u kontinuitetu na svakih deset minuta.

#### III. LINKE-OV FAKTOR MUTNOĆE

Da bi se kvantifikovao nivo atmosferske mutnoće i njen efekat na direktno Sunčevo zračenje koje prihvata Zemljina površina, nekoliko koeficijenata mutnoće je definisano [6]. Među njima najcenjeniji i široko korišćen je Linke-ov faktor mutnoće ( $T_L$ ).

Faktor mutnoće  $T_L$  je predložio i definisao Linke 1922., kao broj čistih i suvih atmosfera neophodnih da se postigne isti efekat na direktno Sunčevo zračenje kao ono koje proizvodi realna atmosfera. On zavisi od optičke dubine čiste i suve atmosfere, koja je zavisna od vazdušne mase, dok je pritom vazdušna masa zavisna od altitudnog ugla Sunca.

Linke-ov faktor mutnoće opisuje optičku dubinu atmosfere usled procesa rasejanja prouzrokovanog aerosolima i molekulima vazduha kao i procesa upijanja uzrokovanog ozonom, vodenom parom, kiseonikom i ugljen dioksidom [7].

U tabeli I prikazane su okvirne vrednosti Linke-ovog faktora mutnoće pod tipičnim atmosferskim uslovima [8].

TABELA I. LINKE-OV FAKTOR MUTNOĆE POD TIPIČNIM ATMOSFERSKIM USLOVIMA

Atmosferski uslovi	Linke-ov faktor mutnoće
Čista Rayleigh atmosfera	1
Ekstremno čisto, hladan vazduh	2
Čisto, topao vazduh	3
Vlažno, topao vazduh	4-6
Zagađena atmosfera	8

Da bi se dobile što preciznije vrednosti faktora mutnoće  $T_L$  neophodno je utvrditi i ispravno modelovati sve klimatske parametre koji se pojavljuju u proračunu. Linke-ov faktor mutnoće može da omogući dobru procenu direktnog zračenja koje dostiže Zemljinu površinu za realnu atmosferu koja sadrži čestice, maglu, isparenja i druge nečistoće [9], [6], [10]. Da bi se izračunao faktor  $T_L$  korišćena je relacija predložena u [7], koja je modifikovana u skladu sa izrazima koji važe pri uslovima vedrog neba predloženim u [11]:

$$T_L = \frac{\ln\left(\frac{A \cdot \sin(\beta)}{I_{BH}}\right)}{\delta_r \cdot m} \quad (1)$$

gde je  $A$  ( $W/m^2$ ) fluks ekstraterestričkog zračenja koje uđe u atmosferu;  $I_{BH}$  ( $W/m^2$ ) je direktna iradijacija na horizontalnoj površini;  $\beta$  ( $^\circ$ ) je altitudni ugao Sunca;  $\delta_r$  je integralna Rayleigh-eve optička debljina usled čisto molekularnog rasejanja (čista i suva atmosfera);  $m$  predstavlja koeficijent vazdušne mase (optička vazdušna masa ili samo vazdušna masa) koji daje odnos dužine puta koju pređu Sunčevi zraci kroz atmosferu u nekom datom trenutku i dužine puta koju pređu Sunčevi zraci kada je Sunce u zenitu.

Za izračunavanje vazdušne mase korišćen je izraz predložen u [11]:

$$m = \frac{1}{\sin \beta} \quad (2)$$

Takođe u [11] dat je izraz za fluks ekstraterestričkog zračenja:

$$A = 1160 + 75 \cdot \sin\left(\frac{360}{365} \cdot (n - 275)\right) \quad (3)$$

gde  $n$  predstavlja redni broj dana u godini od 365 dana.

U literaturi postoji veliki broj relacija za izračunavanje integralne Rayleigh-eve optičke debljine,  $\delta_r$ , najprimenjeniji su izrazi koje je predložio Kasten [10] i izrazi koje je predložio Remund [12]. U ovom radu korišćeni su izrazi koje je predložio Kasten:

$$\delta_r = (6.6296 + 1.7513m - 0.1202m^2 + 0.0065m^3 - 0.00013m^4)^{-1}, \text{ za } m \leq 20 \quad (4)$$

$$\delta_r = \frac{1}{10.4 + 0.718m}, \text{ za } m > 20.$$

Kako merenja daju ukupnu horizontalnu iradijaciju  $I_H$ , a za izračunavanje Linke-ovog faktora mutnoće neophodno je poznavanje direktne komponente horizontalne iradijacije  $I_{BH}$  bilo je potrebno primeniti Liu-Jordan-ovu empirijsku relaciju za dekompoziciju ukupnog horizontalnog zračenja na direktnu i difuznu komponentu koja koristi indeks vedrosti  $K_T$  [11]:

$$\frac{I_{DH}}{I_H} = 1.39 - 4.027K_T + 5.531K_T^2 - 3.108K_T^3 \quad (5)$$

gde je  $I_{DH}$  difuzna komponenta horizontalne iradijacije.

Ukupna horizontalna iradijacija predstavlja se izrazom:

$$I_H = I_{BH} + I_{DH} \quad (6)$$

Indeks vedrosti se definiše kao odnos srednje horizontalne insolacije na površini Zemlje (mernom mestu) i srednje horizontalne ekstraterestricke insolacije na površini atmosfere, na geografskoj širini i dužini koja odgovara mernom mestu na Zemlji:

$$K_T = \frac{\overline{I_H}}{I_0} \quad (7)$$

Veći indeks znači da nebo nije oblačno i da je atmosfera čista i obrnuto. Srednja horizontalna dnevna insolacija ekstraterestričkog zračenja može se dobiti integraljenjem ukupnog ekstraterestričkog zračenja od izlaska do zalaska Sunca i njegovom projekcijom na horizontalnu površinu, što rezultuje sledecom relacijom:

$$\overline{I_0} = \left(\frac{24}{\pi}\right) \cdot SC \cdot \left(1 + 0.034 \cdot \cos\left(\frac{360 \cdot n}{365}\right)\right) \cdot (\cos L \cdot \cos \delta \cdot \sin H_{sr} + H_{sr} \cdot \sin L \cdot \sin \delta) \quad (8)$$

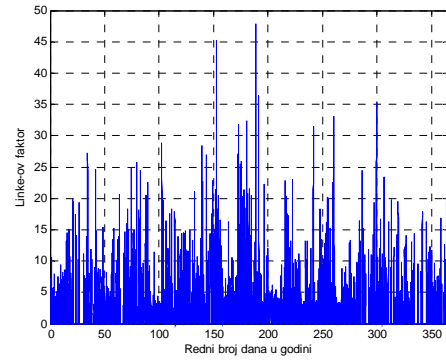
gde su:  $n$  dan u godini,  $SC$  solarna konstanta ( $SC=1377W/m^2$ ),  $H_{sr}$  satni ugao izlaska Sunca,  $L$  geografska širina,  $\delta$  solarna deklinacija.

Proračun srednje mesečne solarne deklinacije i satnog ugla izlaska Sunca su definisani sledećim relacijama:

$$\delta = 23.45 \cdot \sin\left(\frac{360}{365} \cdot (n - 81)\right) \quad (9)$$

$$H_{sr} = \arccos(-\operatorname{tg}L \cdot \operatorname{tg}\delta) \quad (10)$$

Na osnovu predloženog modela izračunate su vrednosti Linke-ovog faktora mutnoće za svaki dan 2009. godine i područje Beograda koje su prikazane na Sl. 1.

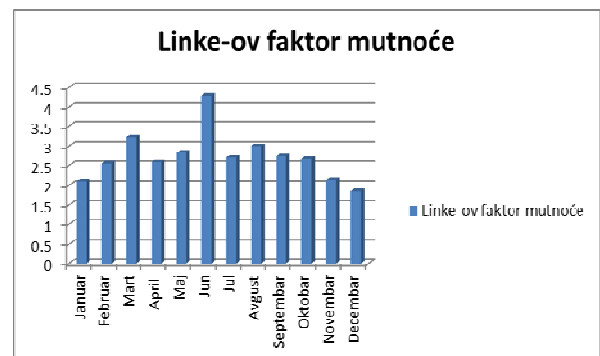


Slika 1. Vrednosti Linke-ovog faktora mutnoće za svaki dan 2009. godine i područje Beograda

Izuzetno velike vrednosti Linke-ovog faktora mutnoće posledica su malih vrednosti direktne horizontalne iradijacije koje su se pojavljivale u toku dana, dobijene vrednosti su usrednjene i predstavljene na mesečnom nivou u tabeli II i na Sl. 2.

TABELA II. SREDNJE VREDNOSTI LINKE-OVOG FAKTORA MUTNOĆE NA MESEČNOM NIVOU

Mesec	Linke-ov faktor mutnoće
Januar	2.1066
Februar	2.5565
Mart	3.2288
April	2.5938
Maj	2.8345
Jun	4.2897
Jul	2.7093
Avgust	3.0014
Septembar	2.7437
Oktobar	2.672
Novembar	2.137
Decembar	1.8495



Slika 2. Usrednjene vrednosti Linke-ovog faktora mutnoće za svaki mesec 2009. godine i područje Beograda

Na osnovu tabele II i Sl. 2 može se uočiti da je juna meseca dobijena maksimalna vrednost faktora  $T_L$  u toku 2009. godine, dok je minimalna vrednost ostvarena decembra meseca.

Velika vrednost dobijena juna meseca posledica je izuzetno toplog vremena sa velikom količinom padavina koje su prouzrokovale veliku vlažnost vazduha.

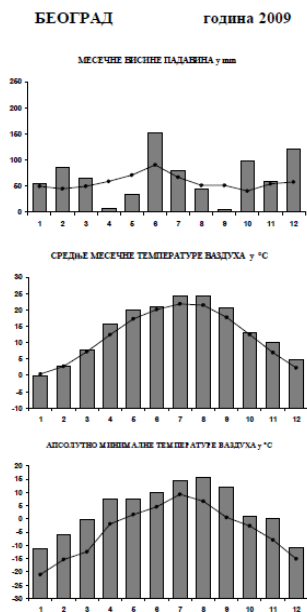
Dobijena vrednost faktora  $T_L$  za mesec jun je u intervalu vrednosti predloženih u tabeli I za vlažno i toplo vreme.

Obilne padavine ostvarene su i decembra meseca i one su uticale na čistoću vazduha uz niske temperature. Sl. 3 predstavlja podatke o količini padavina i temperaturama za Beograd 2009. godine [13].

U okviru tabele III prikazane su godišnje srednje dnevne horizontalne insolacije dobijene na osnovu izmerenih podataka, na osnovu modela koji ne uvažava faktor  $T_L$  i na osnovu modela koji uvažava faktor  $T_L$ . Relativna greška u predikciji srednje dnevne horizontalne insolacije uvažavajući faktor  $T_L$  iznosi 36.25%, dok relativna greška u predikciji koja se dobija ne uvažavajući faktor  $T_L$  iznosi 72.28%.

TABELA III. VREDNOSTI SREDNJE DNEVNE HORIZONTALNE INSOLACIJE NA NIVOU GODINE

Godišnje srednje dnevne horizontalne insolacije (kWh/m <sup>2</sup> )	
Na osnovu merenja	4.69
Uvažavajući faktor $T_L$	6.39
Ne uvažavajući faktor $T_L$	8.08



Slika 3. Mesečne visine padavina i temperature vazduha po meteorološkom godišnjaku za Beograd 2009. godine

## V. ZAKLJUČAK

Izračunate vrednosti Linke-ovog faktora mutnoće verno oslikavaju vremenske prilike koje su vladale u toku analizirane godine na području Beograda. Na osnovu ovih vrednosti može se zaključiti da je najveće slabljenje Sunčevog zračenja ostvareno juna meseca, dok najmanje decembra meseca.

Poznavanje mutnoće atmosfere u lokalnim sredinama povećava tačnost u proceni Sunčevog zračenja, čije vrednosti možemo upotrebiti prilikom dimenzionisanja i ispitivanja performansi sistema za konverziju Sunčeve energije predviđenih za postavljanje na lokacijama koje se odlikuju sličnom klimom kao Beograd.

## LITERATURA

- [1] A.Q. Malik, 'A Modified Method of Estimating Angstrom's Turbidity Coefficient of Solar Radiation Models', Renewable Energy, Vol. 21, N°3-4, pp. 537 - 552, 2000.
- [2] E. Eftimie, 'Linke Turbidity Factor for Braşov Urban Area', Bulletin of the Transilvania University of Braşov, Vol. 2 (51), Series I, pp 61 – 68, 2009.
- [3] S. Mecker, 'CALCULATION OF DIRECT SOLAR AND DIFFUSE RADIATION IN ISRAEL', Int. J. Climatol. Vol. 21, pp 1561-1576, 2001.
- [4] <http://www.beograd.rs/cms/view.php?id=1193>
- [5] <http://www.beograd.rs/cms/view.php?id=1029>
- [6] Angles, J., Menard, L., Bauer, O., Rigollier, C., Wald, L. (1999) A climatological database of the Linke turbidity factor. ISES Solar World Congress, volume I, p. 432-434, ISBN 0 080 0438954, Jerusalem, Israel.
- [7] E. Eftimie, 'SOLAR RADIATION ESTIMATION UNDER CLEAR SKY CONDITIONS FOR BRAŞOV AREA (ROMANIA) – LINKE TURBIDITY FACTOR', RECENT, Vol. 13, no. 2(35), pp 162 – 166, July 2012.
- [8] Scharmer, K., Greif, J. (eds.); The European Solar Energy Atlas, vol. 1 & 2, École des Mines de Paris, Paris, 2000.
- [9] Remund, J., Wald, L., Lefèvre, M., Ranchin, T. (2003) Worldwide Linke Turbidity Information. ISES Solar World Congress, ISBN 0-9750550 0 9, Göteborg, Sweden.
- [10] Kasten, F. (1996) The Linke turbidity factor based on improved values of the integral Rayleigh optical thickness. Solar Energy, no. 56, p. 239-244, ISSN: 0038-092X.
- [11] Gilbert M. Masters, "Renewable and Efficient Electric Power Systems," Stanford University.
- [12] J. Remund, L. Wald, M. Lefèvre and T. Ranchin, "Worldwide Linke Turbidity Information", in Proceedings of ISES Solar World Congress, 16-19 June 2003, Göteborg, Sweden, available at [www.helioclim.org](http://www.helioclim.org).
- [13] Republički hidrometeorološki zavod Srbije, "Meteorološki godišnjak 1. Klimatološki podaci 2009."

## ABSTRACT

Atmospheric turbidity is an important parameter for the assessment of air pollution in local regions, it is also the main parameter that determines the attenuation of solar radiation that reaches the Earth's surface under the clear sky conditions. To evaluate the atmospheric turbidity, the model to calculate Linke's turbidity factor based on one-year measurements of horizontal irradiation in the Belgrade area has been used. The obtained results have been compared to the recommended values for Linke's turbidity factor under typical atmospheric conditions. The maximum value Linke turbidity factor has been achieved in June of the analyzed year, while the minimum has been achieved in December.

## DETERMINATION OF LINKE TURBIDITY FACTOR FOR BELGRADE REGION

Milan Jović  
Milan Ivezić  
Jovan Mikulović