

Aktuelni problemi sa detekcijom u realnim atmosferskim uslovima

Ljiljana Konjević
Fizički fakultet, Univerzitet u Beogradu
Beograd, Srbija
ljiljanakonjevic21@gmail.com

Damjan Sudimac
Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu
Beograd, Srbija
sudimacdamjan11@gmail.com

Katarina Jevtić
Matematički fakultet, Univerzitet u Beogradu
Beograd, Srbija
jevtick06@gmail.com

Mileša Srećković
Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu
Beograd, Srbija
esreckov@etf.bg.ac.rs

Bratislav Iričanin
Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu
Beograd, Srbija
iricanin@etf.rs

Abstract—Za odabrane zagađene atmosferske sredine, izvršena je analiza modelovanja relevantnih optičkih konstanti/parametara, u zavisnosti od koncentracije zagađivača u vazduhu. Za određivanje potrebnih parametara, korišćene su, između ostalih, bazične klasične relacije i aproksimacije (Gladstone–Dale, Maxwell–Garnett). Promena parametara izabranog nosećeg snopa (nekoherentnog/koherentnog, nepolarizovanog/polarizovanog) elektromagnetskog zračenja u atmosferi sa izabranim parametrima, analizirana je u odnosu na referentne vrednosti u vakuumu. U ovom radu, uticaj masene koncentracije zagađivača je posebno razmatran na zabeležene podatke u lokalnoj atmosferi, radi jasnije analize njihovog odnosa, sa posebnim fokusom na vidljivi i daleki infracrveni deo spektra. Istraživanjem je sprovedena detaljna analiza pojava nastalih od ovog faktora i validnost dobijenih podataka, u cilju konkretnih interpretacija primene osnovnih zakona, dostupnih savremenih softverskih paketa i baza podataka.

Ključne reči—zagađenost vazduha, indeks prelamanja, Gladstone–Dale relacija, Maxwell–Garnett aproksimacija

I. UVOD

Uticaj zagađenosti vazduha je teorijski analiziran, radi unapređenja performansi optičkih instrumenata, boljih rezultata i daljeg napretka same atmosferske fizike, kao i njene primene. Ovaj uticaj je razmatran u kontekstu lokalne atmosfere, koji varira na dnevnom nivou, a u određenim slučajevima i u kraćim vremenskim intervalima, u zavisnosti od stepena urbanizacije i zagađenosti. Sama pojava zagađenosti se ispoljava kroz različite supstance, od kojih su za ovaj rad posebno izdvojeni primarni zagađivači i aerosolne čestice u vazduhu (PM). *Particulate Matter*, sitne, čvrste ili tečne čestice koje se mogu pronaći u atmosferi, nastaju usled hemijskih reakcija, u kojima se atmosfera zagađuje na znatnom nivou. One dobijaju naziv na osnovu reda veličine prečnika, izraženog u mikrometrima. Za najzastupljeniji i najopasniji tip suspendovanih čestica se smatraju $PM_{2.5}$ i PM_{10} , koji mogu biti posledica prirodnih izvora (vegetacija prirode) ili veštačkih izvora (sagorevanje industrijskog otpada)[1]. Uzrok njihovog nastajanja igra ključnu ulogu u prirodi njihove dielektrične konstante, a samim tim i njihove vrednosti indeksa prelamanja. Uticaj zagađivača se razmatrao kroz njihov doprinos promeni indeksa prelamanja vazduha, što dovodi do odstupanja vrednosti talasne dužine od

očekivane. Uticaj primarnih zagađivača vazduha na indeks prelamanja sredine je razmatran pomoću Gladstone - Dale relacije, dok je uticaj dve navedene aerosolne čestice razmatran pomoću Maxwell – Garnett aproksimacije. Njihova zastupljenost u vazduhu, koja se može dobiti iz svakodnevnih merenja lokalnih i svetskih meteoroloških centara [2], iskorišćena je u proračunima. U relaciji i aproksimaciji se pojavljuju indeksi prelamanja vazduha n_m , za koji su iskorišćene vrednosti na standardnom atmosferskom pritisku $p=101,325\text{kPa}$, temperaturi $T=0^\circ\text{C}$, [3]:

1. $\lambda_1=589,6\text{nm}$, $n_m(p, T, \lambda_1)=1,00027712$;

2. $\lambda_2=500 \text{ }\mu\text{m}$, $n_m(p, T, \lambda_2)=1,000273$.

Dobijeni rezultati se prikazuju u obliku tabela i grafika zavisnosti talasne dužine od indeksa prelamanja sredine.

II. MATERIJALI I METODE

Za aproksimacije indeksa prelamanja sredine korišćene su Gladstone-Dale (1) [4] i Maxwell-Garnett aproksimacija (2) [5]:

$$n_g = \sum f_i n_i, \quad (1)$$

gde n_g predstavlja indeks prelamanja za medijum, pri kojem se u obzir uzimaju isključivo koncentracije primarnih zagađivača u vazduhu, dok f_i i n_i predstavljaju zapreminski udeo i indeks prelamanja svakog od zastupljenih supstancija, respektivno;

$$n_{\text{eff}}^2 = n_m^2 \left(1 - \frac{3f(n_m^2 - n_p^2)}{2n_m^2 + n_p^2 + f(n_m^2 - n_p^2)} \right), \quad (2)$$

gde n_{eff} predstavlja efektivnu vrednost indeksa prelamanja za sredinu u kojoj se nalaze čestice, koje su relativno manje od posmatrane talasne dužine, n_p predstavlja indeks prelamanja za zagađivače, n_m predstavlja indeks prelamanja za medijum, koji je u našem slučaju vazduh, a f zapreminski udeo zagađivača. Radi jednostavnosti, pretpostavljeno je da su sve čestice sfernog oblika i da je $f \ll 1$. Takođe, aproksimirajući da su vrednosti indeksa prelamanja PM čestica jednake, njihovi zapreminski udeli mogu biti sabrani, zbog prirode indeksa prelamanja, dielektrične konstante i Maxwell-Garnett aproksimacije. Efektivna vrednost indeksa se može iskoristiti za određivanje vrednosti talasne dužine λ u zagađenoj sredini, pomoću jednačine (3):

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n_{\text{eff}}}, \quad (3)$$

u kojoj λ_0 označava talasnu dužinu svetlosti u vakuumu.

Za analizu uticaja zagađenosti, posmatrane su sledeće sredine:

1. Dan kada je zabeleženo najveće zagađenje u Beogradu, Srbiji (12.10.2022.);
2. Dan iz skorijeg vremenskog perioda u Beogradu, Srbiji, čime je obezbeđena relevantnost i ažurnost analize (02.04.2025.);
3. Donja granica zagađenosti za veoma nezdrave sredine, prema podacima [2];
4. Hipotetički zagađena sredina, uslovi koji bi se javili pri havarijskim situacijama u industrijskim zonama, izuzetno blizu samoj zoni nakon nekoliko časova (kada bi već došlo do standardnog pritiska i temperature);
5. Hipotetički zagađena sredina, pri kojim uslovima bi se pojavile značajnije promene.

Gladstone – Dale relacija, primenjena je za izračunavanje za prve dve sredine, dok je Maxwell – Garnett aproksimacija iskorišćena za sve sredine.

Za njih su pronađeni podaci [2], koji su prikazani u tabelama I i II.

TABELA I. MASENA KONCENTRACIJA ZAGAĐIVAČA VAZDUHA NA DVA POSMATRANA DANA U BEOGRADU, SRBIJI, DVE ZAGAĐENE SREDINE KOJE MOGU DA SE JAVE U REALNIM USLOVIMA, KAO I JEDNA HIPOTETIČKA SREDINA

R. br	Tabela I		
	Čestica	PM _{2,5}	PM ₁₀
1	Masena koncentracija [$\frac{\mu g}{m^3}$] izmerena 12.10.2022.	82,7	115
2	Masena koncentracija [$\frac{\mu g}{m^3}$] izmerena 02.04.2025.	8	15,2
3	Masena koncentracija [$\frac{\mu g}{m^3}$] za veoma nezdrave sredine	150	355
4	Masena koncentracija [$\frac{\mu g}{m^3}$] pri incidentu u industrijskim zonama	1000	2000
5	Masena koncentracija [$\frac{\mu g}{m^3}$] u hipotetičkoj zagađenoj sredini	1.5 x 10 ⁹	3 x 10 ⁹

TABELA II. MASENA KONCENTRACIJA PRIMARNIH ZAGAĐIVAČA VAZDUHA NA DVA POSMATRANA DANA U BEOGRADU, SRBIJI.

R. br	Tabela II				
	Čestica	CO	SO ₂	NO ₂	O ₃
1	Masena koncentracija [$\frac{\mu g}{m^3}$] izmerena 12.10.2022.	2560	19	67	42,7
2	Masena koncentracija [$\frac{\mu g}{m^3}$] izmerena 02.04.2025.	360	6,8	13,6	77,1

Zapreminski udeli zagađivača su izračunati po formuli (4):

$$f = \frac{c_m}{\rho}, \quad (4)$$

gde c_m i ρ predstavljaju masenu koncentraciju, odnosno gustinu zagađivača, respektivno, za koje su korišćene vrednosti iz tabele III, [6].

TABELA III. VREDNOSTI GUSTINA ČESTICE ZAGAĐIVAČA.

R. br	Tabela III	
	Čestica	Gustina čestice [$\frac{kg}{m^3}$]
1	CO	1,14
2	SO ₂	2,619
3	NO ₂	1,88
4	O ₃	2,144
5	PM _{2,5}	1500 (varira u opsegu 1200-1800, zavisi od hemijskog sastava)
6	PM ₁₀	2000 (varira u opsegu 1500-2500, zavisi od hemijskog sastava)

Za indekse prelamanja, uzete su vrednosti iz tabele IV [3],[6].

TABELA IV. VREDNOSTI INDEKSA PRELAMANJA ČESTICA.

R. br	Tabela IV	
	Supstanca	Indeks prelamanja čestice n
1	Vazduh (Gladstone-Dale)	1,00027712
2	Vazduh (Maxwell-Garnett)	1,000273
3	CO	1,000338
4	SO ₂	1,000686
5	NO ₂	1,449
6	O ₃	1,00052
7	PM _{2,5}	1,5 (varira u opsegu 1,4-1,6)
8	PM ₁₀	1,5 (varira u opsegu 1,4-1,7)

III. REZULTATI

Radi efikasnijeg prikaza podataka i preciznijih vrednosti, u radu je korišćen programski jezik Python. Korišćene su biblioteke NumPy i Matplotlib.

Koristeći se sa (1) i (4) i tabelama II-IV, dobijeni su podaci za indeks prelamanja u posmatranim sredinama, prikazani u tabeli V, dok su u tabelama VI-VIII prikazane vrednosti talasnih dužina odabranih spektralnih linija helijuma i neona [7] u datim sredinama, dobijenih pomoću (3). Naznačene decimale u vrednostima dobijenim u zagađenim sredinama, predstavljaju razliku u odnosu na indeks prelamanja čistog vazduha.

TABELA V. VREDNOSTI INDEKSA PRELAMANJA U POSMATRANIM SREDINAMA, POMOĆU GLADSTONE-DALE RELACIJE.

R. br	Tabela V	
	Sredina	Indeks prelamanja - n_{eff}
1	Vakuum	1
2	Čist vazduh	1,00027712
3	Beograd, 12.10.2022.	1,0002771361362386
4	Beograd, 02.04.2025.	1,0002771232751055

TABELA VI. VREDNOSTI TALASNIH DUŽINA IZ SPEKTRA HELIJUMA U ODABRANIM SREDINAMA.

R. br	Tabela VI	
	He - λ [nm]	He - λ [nm]
1	447,1	492,2
2	446,97613397375324	492,0636393242704
3	446,97612676323797	492,06363138641404
4	446,9761325102648	492,0636377131566

TABELA VII. VREDNOSTI TALASNIH DUŽINA IZ SPEKTRA NEONA I HELIJUMA U ODABRANIM SREDINAMA.

R. br	Tabela VII	
	Ne - λ [nm]	He - λ [nm]
1	540,0	587,6
2	539,8503966580781	587,437209400531
3	539,8503879493368	587,4371999241303
4	539,850394890501	587,4372074771451

TABELA VIII. VREDNOSTI TALASNIH DUŽINA IZ SPEKTRA NEONA U ODABRANIM SREDINAMA.

R. br	Tabela VIII	
	Ne - λ [nm]	Ne - λ [nm]
1	614,3	703,2
2	614,1298123464026	703,0051832036306
3	614,129802439403	703,0051718629143
4	614,1298103356198	703,0051809018523

Koristeći se sa (2) i (4) i tabelama I, III i IV, dobijeni su podaci za indeks prelamanja, prikazani u tabeli IX. Naznačene decimale u vrednostima dobijenim u zagađenim sredinama predstavljaju razliku u odnosu na indeks prelamanja čistog vazduha.

TABELA IX. VREDNOSTI INDEKSA PRELAMANJA U POSMATRANIM SREDINAMA POMOĆU MAXWELL-GARNETT APROKSIMACIJE.

R. br	Tabela IX	
	Sredina	Indeks prelamanja - n_{eff}
1	Čist vazduh	1,000273
2	Beograd, 12.10.2022.	1,0002730000496702
3	Beograd, 02.04.2025.	1,0002730000057034
4	Veoma zagađena sredina	1,000273000122375
5	Slučaj incidenta u industrijskim zonama	1,0002730007349847
6	Hipotetički zagađena sredina	1,001375679899666

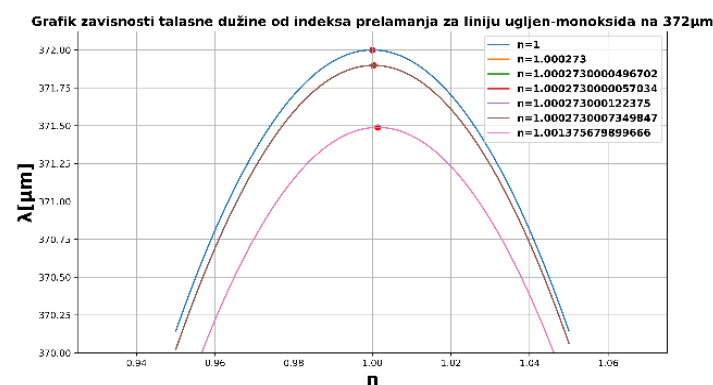
Za eksperimentalne vrednosti, uzete su talasne dužine iz spektra ugljen-monoksida (CO), voda (H₂O) i ozona (O₃) [8], prikazane u tabeli X.

TABELA X. VREDNOSTI TALASNIH DUŽINA IZ SPEKTRA UGLJEN-MONOKSIDA, VODE I OZONA.

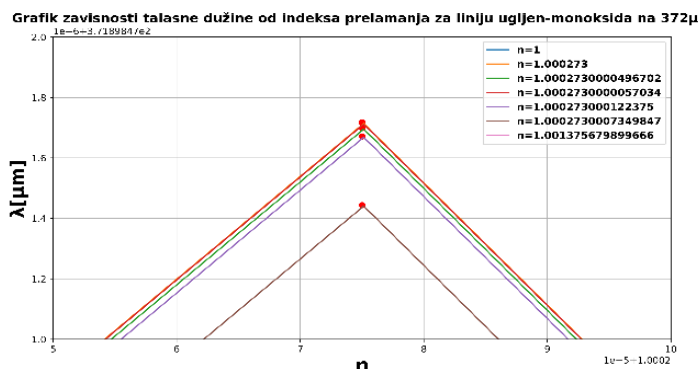
R. br	Tabela X	
	Molekul	Talasna dužina u vakuumu $[\mu\text{m}]$
1	CO	372
2	H ₂ O	398,8
3	CO	433,6
4	O ₃	479,6
5	H ₂ O	538,2

Na osnovu (3) i tabela IX i X, dobijeni su grafici 1-6. U cilju modelovanja spektralne linije, na graficima je primenjena Gausova funkcija, kako bi se dobile uporedive linije sa onima koje bi se mogle detektovati tokom eksperimentalnog merenja.

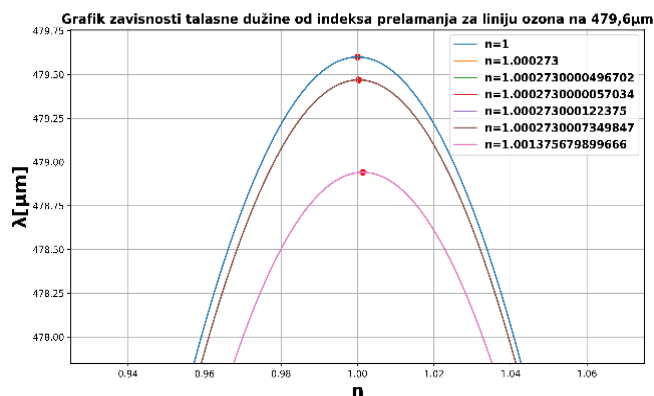
Na svim graficima, mogu se razaznati 3 spektralne linije. Posmatrajući odozgo nadole, prva linija odgovara vrednosti u vakuumu ($n=1$), druga linija odgovara vrednostima u vazduhu i realnim sredinama ($n \approx 1,000273$), dok treća linija odgovara hipotetičkoj sredini 5 ($n=1,001375679899666$). Radi bolje preglednosti dobijenih rezultata, za prvu eksperimentalno odabranu liniju su prikazana dva grafika – grafik 1 prikazuje sve dobijene podatke, dok grafik 2 predstavlja uvećani prikaz dela gde su vrednosti bliske i međusobno se malo razlikuju ($n = 1,0002730000496702$, $n = 1,0002730000057034$, $n = 1,000273000122375$, $n = 1,0002730007349847$). Na grafiku 2, linija u vazduhu se poklapa sa linijom u prvoj realnoj sredini.



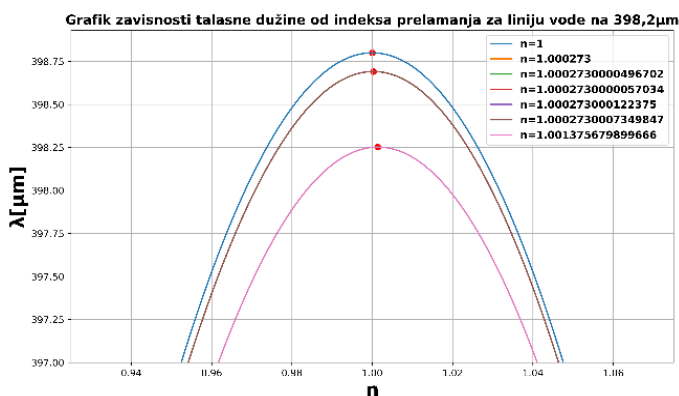
Grafik 1. Zavisnost talasne dužine od indeksa prelamanja za prvu eksperimentalnu vrednost.



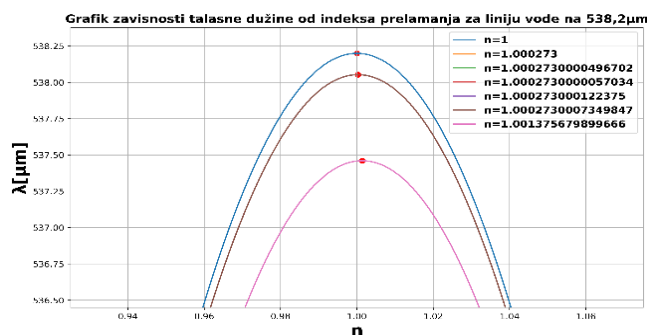
Grafik 2. Uvećani deo grafika 1, hipotetička predstava.



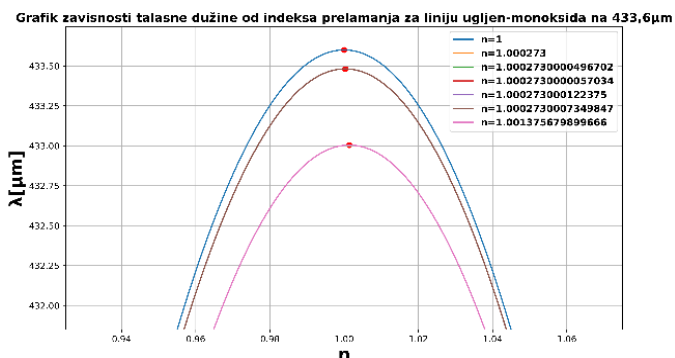
Grafik 5. Zavisnost talasne dužine od indeksa prelamanja za četvrtu eksperimentalnu vrednost.



Grafik 3. Zavisnost talasne dužine od indeksa prelamanja za drugu eksperimentalnu vrednost.



Grafik 6. Zavisnost talasne dužine od indeksa prelamanja za petu eksperimentalnu vrednost.



Grafik 4. Zavisnost talasne dužine od indeksa prelamanja za treću eksperimentalnu vrednost.

IV. DISKUSIJA

Analizom rezultata, prikazanim u tabelama i na graficima, uočene su promene u talasnim dužinama, nastale od zagađenosti vazduha. Posmatrajući slučajeve, koji se mogu pojaviti u realnim sredinama u odnosu na hipotetički zagađenu sredinu, može se uočiti znatna razlika. Promena talasne dužine u fiktivno zagađenoj sredini se može uočiti, čak na prvoj decimali, dok se u realnim sredinama pojavljuje tek pri većoj numeričkoj preciznosti. Iz rezultata dobijenih korišćenjem Gladstone – Dale relacije, može se zaključiti da je uticaj primarnih zagađivača srazmerno proporcionalan njihovoj zastupljenosti.

Može se pretpostaviti da je do veće promene indeksa prelamanja došlo primenom Gladstone - Dale relacije, jer su posmatrana četiri zagađivača, sa većim zapreminskim udelima, u odnosu na Maxwell – Garnett aproksimaciju, gde su posmatrane dve PM čestice, sa veoma malim zapreminskim udelima. Očekuje se da znatnija promena talasnih dužina, koja nastaje na putu do detektora, može biti posledica drugog uzroka, koji se može pretpostaviti da je rezultat šumova, nastalih od rasejanja. Ovo su simulacije koje ističu potrebu za posebnim osvrtnom na karakteristike detektora.

Sa druge strane, problem može nastati kod spektralnih linija koje su međusobno bliske. Spektralne linije, koje su korišćene kao eksperimentalne vrednosti, nisu dovoljno bliske po talasnoj dužini da bi posmatrane promene imale značajan uticaj na njihovo prepoznavanje. Na primer, atom natrijuma, u svom spektru sadrži dve linije, koje su međusobno bliske: D_1 i D_2 ($\lambda(D_1)=589 \text{ nm}$; $\lambda(D_2)=589,6 \text{ nm}$), poznatije kao „natrijumski

dublet” [5]. Zagađenje vazduha, zajedno sa ostalim faktorima koji utiču na talasnu dužinu, mogu prouzrokovati pogrešno očitavanje pomenutih linija, koje igraju bitnu ulogu u astronomskim merenjima.

V. ZAKLJUČAK

Zagađenost vazduha je, u poslednjim decenijama, postala globalni problem, čiji se negativni uticaj može primetiti, ne samo kod ljudi, već i kod raznih tehnoloških sistema. Analizirajući rezultate dobijene u radu, može se uočiti uticaj zagađenja u tehničkim primenama. Posmatrani faktor može prouzrokovati nesigurnost kod merenja optičkih karakteristika svetlosti u različitim sredinama (talasna dužina, indeks prelamanja, intenzitet svetlosti...).

Uticaj same nesigurnosti varira u zavisnosti od mernog instrumenta. Ova pojava ne predstavlja veliku smetnju kod instrumenata koji se fokusiraju na merenje intenziteta svetlosti (fotodetektor), ali problem može nastati kod instrumenata koji mere talasne dužine sa velikom preciznošću (interferometri, spektrometri). U dobijenim rezultatima, odstupanja merenih vrednosti se mogu očitati na instrumentima visokih rezolucija[8], [9]. Sam faktor ima veće posledice za merenja na velikim rastojanjima (poseban značaj kod astronomskih merenja). Rezultati u dobijenom radu predstavljaju hipotetičke rezultate, koji bi se mogli iskoristiti za realne analize. U budućim istraživanjima, mogli bi se posmatrati uticaji u drugim urbanim sredinama u okolini.

REFERENCE/LITERATURA

- [1] Website: https://stratos.ro/en/pm10-si-pm2-5-ce-inseamna-si-ce-efecteau/#1_PM10si_PM25_%E2%80%9393_ce_inseamna_si_cum_se_for_meaza, preuzeto 20.3.2025.
- [2] Web site: <https://www.iqair.com> preuzeto 2.4.2025.
- [3] P.E. Ciddor, Refractive index of air: new equations for the visible and near infrared, *Applied Optics* 35, 1996, pp.1566-1573.
- [4] G.T. Wang, K.A. Daniel., K.P. Lynch, D.R.Guildenbecher,Y.C. Mazumdar, High temperature and pressure Gladstone-Dale coefficient measurements in air behind reflected shock waves, *Physics of Fluids* 35, 086121, 2023. (website: <https://doi.org/10.1063/5.0162017>)
- [5] V. Markel, *Journal of the Optical Society of America A*, Vol. 33, Issue 7, 2016, pp. 1244-1256.
- [6] W.M. Haynes, D.R. Lide. And T.J.Bruno, editor. *CRC Handbook of Chemistry and Physics.*, CRC Press, 2016⁹⁷.
- [7] Web site: https://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html preuzeto 4.4.2025.
- [8] <https://hitran.org/> preuzeto 4.4.2025.
- [9] Y. Zhang, L. Wanzhuo,D. Wenhao, H. Zhanhua, Y. Huaidong Echelle Grating Spectroscopic Technology for High-Resolution and Broadband Spectral Measurement. *Applied Science* 12, 11042, 2022 (Website: <https://doi.org/10.3390/app122111042>)
- [10] G. Hernandez, *Fabry-Perot Interferometers*, Cambridge University Press, Cambridge, 1986.
- [11] M. A. Linne, *Spectroscopic measurement: An introduction to the fundamentals*, Academic Press, London, 2024².
- [12] T. Takamura, M. Tanaka, T. Nakajama, Effects of Atmospheric Humidity on the Refractive Index and the Size Distribution of Aerosols as Estimated from Light Scattering Measurements, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, Vol. 62, No. 3, 1984.
- [13] M. Born, E. Wolf, *Principles of optics: Electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light*, Cambridge University Press, 1999-2019¹⁵.
- [14] C.F. Bohren, D.R. Huffman, *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*, Wiley Science Series, John Wiley & Sons, 2008.
- [15] F.S. Crawford, *Waves*, McGraw-Hill, New York, SAD, 1968³.
- [16] R. Ruppini, “Evaluation of extended Maxwell-Garnett theories”, *Opt. Commun.* 182, 2000, pp. 273-279.

CONTEMPORARY ISSUES IN DETECTION UNDER REAL-WORLD ATMOSPHERIC CONDITIONS

Ljiljana Konjević, Damjan Sudimac, Katarina Jevtić, Mileša Srećković, Bratislav Iričanin

ABSTRACT

For chosen atmospheric environments, an analysis was conducted on the modeling of relevant optical constants, depending on the concentration of aerosols in the air. To determine the necessary constants/parameters, basic classical relations and approximations (Gladstone – Dale, Maxwell-Garnett) were used. The change in the parameters of the selected carrier beam of (incoherent/coherent, unpolarized/polarized) electromagnetic radiation in the atmosphere with the chosen parameters was analyzed in relation to reference values in vacuum. In this paper, the impact of the mass concentration of pollutants is specifically considered in relation to the measured data in the local atmosphere, with special emphasis on the visible and far-infrared parts of the spectrum. The research involved a detailed analysis of the selected influential factor and the validity of the obtained data, with the aim of concrete interpretations of the application of fundamental laws, available modern software packages, and databases.