

Dron-sondaža

Drone-sonde

Petra Kljajić (3.m), Duje Samardžić (3.m), Luka Tomić (3.m)

Zrinko Bahorić, 092 323 1711, zrinko.bahoric@gmail.com

Šumarska i drvodjeljska škola Karlovac

Karlovac, 47000

Sažetak rada:

Ovim projektom pokušali smo napraviti radiosondažu pomoću koje ćemo promatrati temperaturu, relativnu vlažnost i tlak zraka. Pomoću drona simulirali smo radiosondažno mjerenje atmosfere. Zanimalo nas je do koje visine ćemo moći mjeriti vertikalni profil atmosfere, kako se određeni meteorološki elementi mijenjaju s porastom visine, utječu li navedene promjene na izgled dimne perjanice. Mjerenja smo radili pomoću drona i senzora za navedene meteorološke parametre. Iz tog razloga mjerenje smo nazvali dron-sondažno mjerenje. Zbog specifičnosti mjerenja pomoću drona, bili smo ograničeni na mjerenja od 60 do 120 m. U rezultatima mjerenja vidi se kako se temperatura, relativna vlažnost i tlak zraka mijenjaju s visinom te kako te promjene utječu na izgled dimne perjanice dimnjaka Gradske toplane Karlovac, prije svega temperatura zraka. Smatramo da je vrlo važno pratiti dimnu perjanicu toplane grada zbog zagađenja zraka u gradu, ali i u bližoj/široj okolini grada. Mjerenja su se odvijala u Karlovcu od veljače 2023. do svibnja 2023. godine.

Summary of work:

With this project, we tried to make a radiosonde with which we will observe temperature, relative humidity and air pressure. We will try to simulate using a drone radiosonde measurement of the atmosphere. We are interested to what height we will be able to measure vertically the profile of the atmosphere, as certain meteorological elements change with increasing altitude, are affected or changes to the appearance of the smoke plume. Measurements will be made using a drone and sensors for the mentioned meteorological parameters. For this reason, we called the measurements drone-sounding measurement. Due to the specifics of drone measurements, we were limited to measurements from 60 to 120 meters. The measurement results show how temperature, relative humidity and air pressure change with height and how these changes affect the appearance of the smoke plume of the Karlovac City Heating Plant's chimney, above all the air temperature. We believe that it is very important to monitor the smoke plume of the city's heating plant due to air pollution in the city, but also in the immediate/wider surroundings of the city. Measurements take place in Karlovac from February 2023. to May 2023.

Uvod

U ovom projektu željeli smo simulirati radiosondažno mjerenje dronom i osjetnikom koji može kontinuirano mjeriti i pohranjivati podatke temperature, relativne vlažnosti i tlaka zraka. Takvim mjerenjima željeli smo analizirati vertikalni profil atmosfere te utječu li i kako navedeni meteorološki parametri na izgled dimne perjanice dimnjaka Gradske toplane Karlovac. Cilj nam je bio i usporediti naša mjerenja s profesionalnim radiosondažnim mjerenjem, ne u smislu apsolutnih razlika mjerenja, već u smislu trendova promjena navedenih meteoroloških veličina. Naučili smo da su profesionalna radiosondažna mjerenja zahtjevna u financijskom ali i izvedbenom dijelu. Također, naša dron-sondaža bila je zahtjevna i u financijskom i izvedbenom dijelu mjerenja. Naše mjerenje dronom nazvali smo dron-sondažom. Prvi problemi s kojim smo se susreli bilo je upravljanje dronom. Bilo je potrebno položiti ispit za upravljanje bespilotnim letjelicama u kategoriji - otvorena potkategorija A1/A3. Nakon toga dron je trebalo osigurati, zatim registrirati školu u Agenciji za civilno zrakoplovstvo kao operatora letova dronom. Nakon toga potrebna je bila i registracija operatora (Šumarska i drvodjeljska škola Karlovac) kod Hrvatske kontrole zračnog prometa u svrhu prijave na AMC portal, gdje se može dobiti odobrenje za let dronom u unaprijed rezerviranom zračnom prostoru. Kad smo obavili sve administrativne procedure mogli smo započeti s mjerenjima. Ovdje treba napomenuti da je za vrijeme svakog mjerenja najvažnije bilo voditi računa o sigurnosti svih koji su mjerenja izvodili, ali i o sigurnosti svih onih koji su se mogli zateći u blizini mjesta mjerenja, u tom smislu pridržavali smo se svih propisanih procedura i pravila te na ispravan način upravljali dronom, uzevši u obzir i vremenske prilike/neprilike.

Sredstva za dron i osjetnik dobili smo od Ministarstva znanosti i obrazovanja RH u sklopu natječaja "Financiranje projekata u sklopu izvannastavnih aktivnosti osnovnih i srednjih škola te učeničkih domova u školskoj godini 2022./2023."

Dron smo odabrali i kupili nakon konzultacija i ostvarenom suradnjom s predsjednikom Udruge bespilotni sustavi u kriznim situacijama Hrvatska, gospodinom Brunom Kekeзом. Zatražili smo mišljenje stručnjaka jer nama je bio potreban dron koji može nositi i određeni teret (osjetnik). Nakon konzultacija odlučili smo se na Typhoon H3 proizvođača Yuneec, (slika 1).



Slika 1. Dron Yuneec Typhoon H3, [3]

Figure 1 Drone Yuneec Typhoon H3

Neke od karakteristika našeg drona:

Težina drona: 2000 g (uključujući kameru)

Vrijeme leta: do 25 min

Maksimalna visina letenja: 500 m

Maksimalna brzina penjanja: 5 m/s

Maksimalna horizontalna brzina: 20 m/s

Radna temperatura: -10°C do 40°C

Maksimalni domet: 5000 m

Osjetnik smo nabavili također iz sredstava odobrenog projekta ministarstva znanosti i obrazovanja. Kod osjetnika bilo nam je važno da osim mjerenja promatranih veličina ta mjerenja možemo i pohranjivati. Osjetnik ima memorijsku jedinicu za pohranu izmjerenih podataka. Odabrali smo osjetnik EasyLog EL-SIE-6+, (slika 2). Instrument mjeri temperaturu, relativnu vlažnost zraka, tlak zraka i temperaturu rosišta, intervali dva uzastopna mjerenja mogu biti od 1 sekunde do 1 sata. Podaci se pohranjuju te se spajanjem na server (Easylog) mogu lako preuzeti. Ovdje smo naišli na nekoliko problema koje smo trebali riješiti. Prvi je bio tehničkog tipa - kako senzor učvrstiti na dron, a da pri tom dron nema narušenu ravnotežu te da senzor ne može ispasti s drona. To smo riješili na način da smo napravili maleni kavez u koji smo stavili senzor i pričvrstili ga trakicama ispod drona, na taj način senzor ne može ispasti, a dron može sigurno letjeti. Kavez smo radili od tanke žice, sa što većim (no takvim da senzor ne može ispasti) razmakom, da bi prozračivanje unutar kaveza bilo što bolje, (slika 6). Također debljina žice je mala (promjer 0,5 mm) da bi što više smanjili utjecaj kaveza na same rezultate mjerenja. Iz tog razloga nismo se odlučili na plastične ili drvene materijale koji su puno bolji toplinski izolatori od metala. Tako smo osigurali optimalne uvjete da senzor može bilježiti stvarne promjene meteoroloških veličina u atmosferi. Sljedeći problem senzora je bilo vrijeme odziva. Dron se može gibati različitim vertikalnim brzinama te senzor ne može bilježiti stvarne promjene na odgovarajućoj visini. To smo riješili i tako da smo prilikom mjerenja svakih 10 m (to je bila naša prostorna rezolucija mjerenja) zaustavili dron i ostavili ga 30 sekundi, te krenuli na sljedeću visinu plus 10 m itd.

Mjerno mjesto bilo je u arboretumu naše škole u neposrednoj blizini meteorološkog kruga. Mjerno mjesto je trebalo zadovoljavati uvjete da se u blizini ne nalaze nikakva veća drveća koja bi granama ometala let drona. Drugo mjesto promatranja je bio dimnjak gradske toplane, (slika 3). Dimnjak gradske toplane Karlovac nalazi se na koordinatama 45.49086°N, 15.54717°E, visok je 70m, nadmorska visina Gradske toplane je 111m. Mjerna postaja kod škole nalazi se na koordinatama 45.49421°N, 15.56341°E, nadmorska visina je 111 m. Iz ovih podataka se može vidjeti da su mjerno mjesto i toplana na istoj nadmorskoj visini te da je 70 m visinska razlika od vrha dimnjaka do tla. Dalje u radu ćemo (osim kod usporedbe s profesionalnom sondažom) koristiti termin visina, gdje ćemo podrazumijevati 0 m početnu točku tj. tlo (koje je na nadmorskoj visini 111 m) te npr. visina 70 m koja označava visinu 70 m od tla.



Slika 2. Senzor EasyLog EL-SIE-6+

Figure 2 Sensor EasyLog EL-SIE-6+



Slika 3. Mjerno mjesto kod škole i dimnjak Gradska toplane Karlovac, zračna udaljenost 1340 m

Figure 3 Measuring point near the school and chimney of Karlovac City Heating Plant, aerial distance 1340 m

Istraživačka pitanja:

1. Kako se temperatura zraka, tlak zraka i relativna vlažnost zraka mijenjaju s porastom visine?
2. Mijenjaju li se uvijek isto temperatura zraka, tlak zraka i relativna vlažnost zraka s promjenom visine?
3. Utječe li i kako promjena temperature zraka s visinom na izgled dimne perjanice?
4. Kakva će biti odstupanja profesionalne radiosondaže Maksimir u odnosu na naša mjerenja?

Hipoteze:

1. S porastom visine:
 - 1.1. relativna vlažnost zraka će se linearno smanjivati.
 - 1.2. tlak zraka će se smanjivati eksponencijalno.
2. S porastom visine temperatura zraka će:
 - 2.1. Opadati u prosjeku za $0,65\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$.
 - 2.2. Opadati više od prosjeka u slučaju utjecaja ciklone na području Karlovca.
 - 2.3. Opadati manje od prosjeka u slučaju utjecaja anticiklone na području Karlovca
3. Dimna perjanica dimnjaka Gradske toplane Karlovac će:
 - 3.1. Imati izgled "zavjese" u slučaju temperaturne inverzije na visini 70 m i više, neće se izrazito podizati vertikalno u vis (zakretati će se ovisno o smjeru vjetra).
 - 3.2. Podizati se vertikalno u vis (zakretati smjer ovisno o vjetru) u slučaju da temperatura s visinom opada na visini 70 m i više.

Metode istraživanja

Koristili smo GLOBE atmosfenske protokole za mjerenje temperature zraka, relativne vlažnosti zraka i tlaka zraka. Posebnost našeg mjerenja je to što smo promatrali kako se navedene količine mijenjaju s porastom visine. Koristili smo senzor EasyLog EL-SIE-6+ koji može mjeriti i pohranjivati podatke temperature zraka, tlaka zraka, relativne vlažnost zraka i temperature rosišta. Nakon mjerenja, preuzeli smo podatke te ih obradili. Podatke smo prikazali odgovarajućim grafikonima.

Vertikalnu promjenu temperature računali smo prema izrazu (1):

$$\gamma = \frac{\Delta t}{\Delta z} \quad (1),$$

Gdje je Δt promjena temperature, a Δz promjena visine.



Slika 4. i 5. Dron-sondaža na visini 20 m (lijevo). Dron-sondaža prilikom polijetanja.

Figure 4 & 5 Drone sounding at a height of 20m (left). Drone sounding when taking off



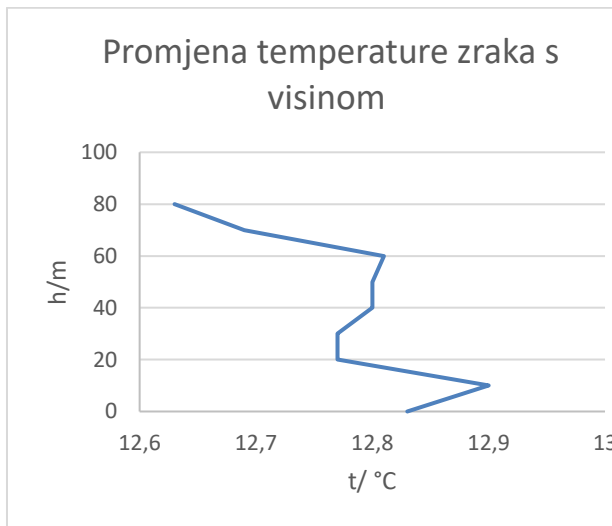
Slika 6. Izrada nosača za senzor

Figure 6 Making a support for the sensor

Prikaz i analiza podataka

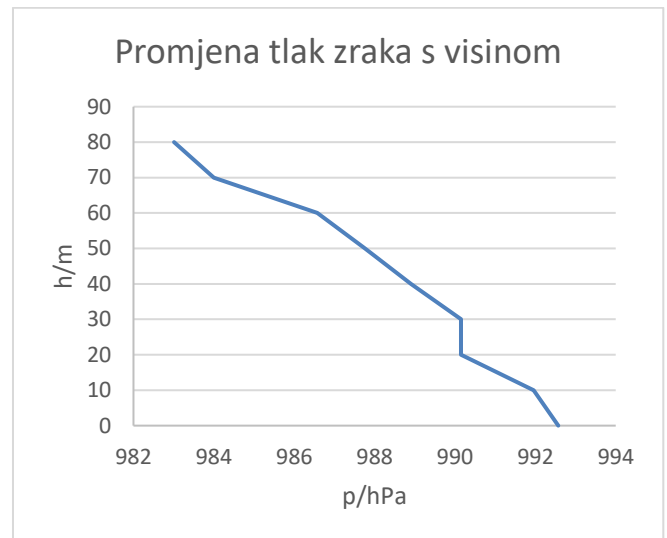
Svako mjerenje prikazano je grafički po danu i terminu mjerenja. Za temperaturu je izračunat prosječni vertikalni gradijent temperature te je svakom mjerenju pridružena slika izgleda dimne perjanice u terminu mjerenja dron-sondažom, ako je dimna perjanica u tom trenutku bila vidljiva.

1. Mjerenje, 7.3.2023. u 17:00h, visina 80 m



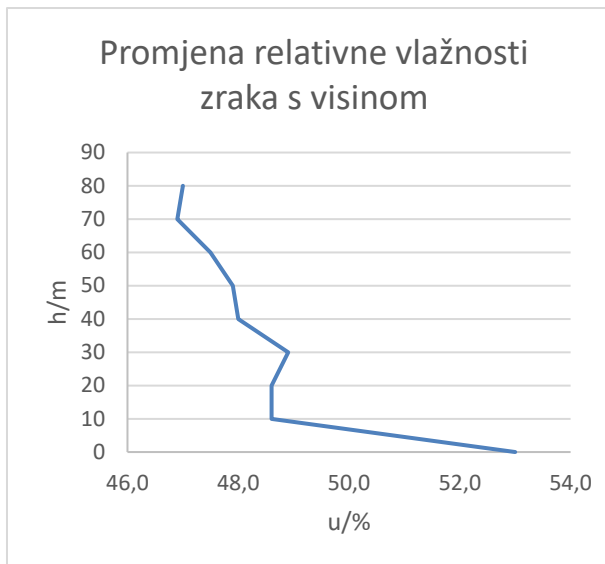
Graf 1. Promjena temperature zraka s visinom
7.3.2023. u 17:00h, Karlovac

Graph 1 Change in air temperature with
altitude 3/7/2023 at 17:00, Karlovac



Graf 2. Promjena tlaka zraka s visinom
7.3.2023. u 17:00h, Karlovac

Graph 2 Change in air pressure with altitude
3/7/2023 at 17:00, Karlovac



Graf 3. Promjena relativne vlažnosti zraka s visinom 7.3.2023. u 17:00h, Karlovac

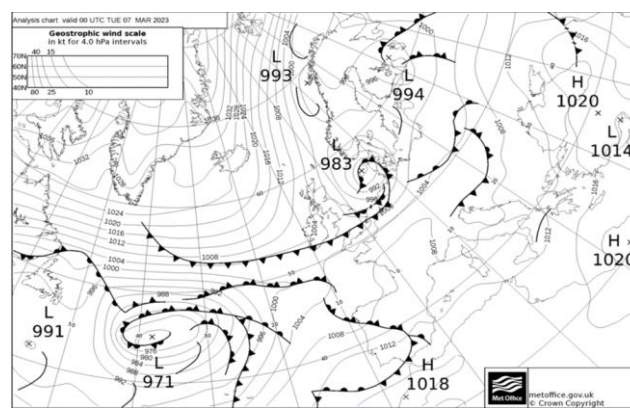
Graph 3 Change in relative air humidity with altitude 3/7/2023 at 17:00, Karlovac



Slika 7. Dimna perjanica Gradske toplane Karlovac, 7.3.2023.

Figure 7 Smoke plume of Karlovac City Heating Plant, 3/7/2023

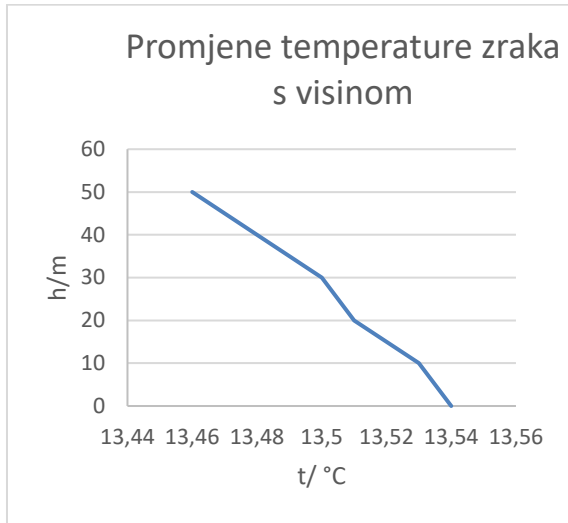
Iz prvog slučaja mjerenja može se vidjeti kako tlak konstantno opada s visinom, iako ne možemo još ništa konkretno reći o eksponencijalnom opadanju. Relativna vlažnost zraka varira i nikako ne pokazuje linearno opadanje s visinom. Temperatura zraka u sloju 80 m u prosjeku opada s visinom, iako imamo i nekoliko temperaturnih inverzija u slojevima u prvih 10 m te od 30 m do 60 m. Srednji temperaturni gradijent, izračunat prema relaciji (1) za 80 metara iznosi $-0,25^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ili $-0,025^{\circ}\text{C}/10\text{m}$. Možemo zaključiti da je atmosfera tog dana bila relativno nestabilna, a od 60 metara temperatura je u konstantnom padu do 80 m te u takvim situacijama očekujemo uzdizanje dimne perjanice. Slika 7. prikazuje dimnu perjanicu za taj dan koja se u ovom slučaju poklapa s našim očekivanjima, diže se vertikalno u vis.



Slika 8. Sinoptička karta, 7.3.2023

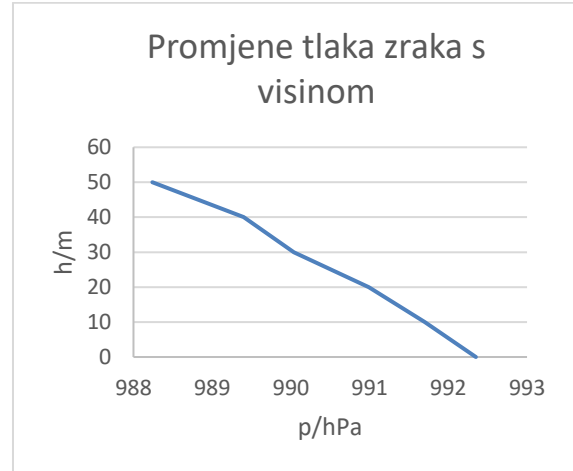
Figure 8 Synoptic map, 3/7/2023

2. Mjerenje, 8.3.2023. u 17:00h, visina 50 metara



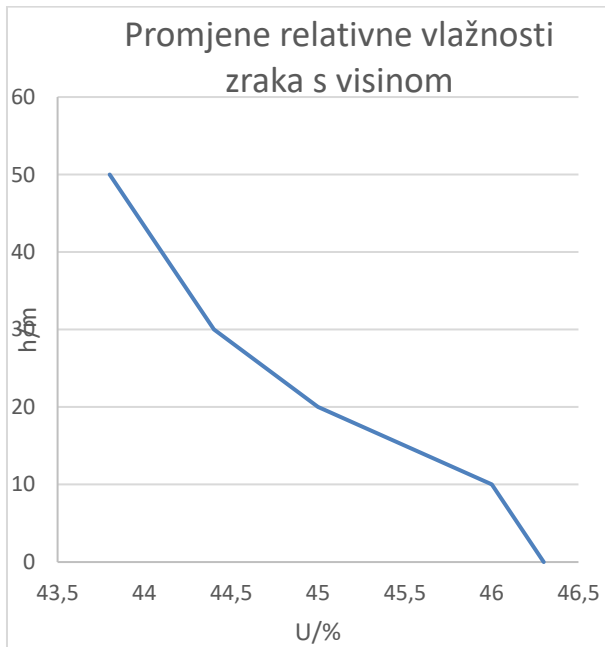
Graf 4. Promjena temperature zraka s visinom 8.3.2023. u 17:00h Karlovac

Graph 4 Change in air temperature with altitude 3/8/2023 at 17:00, Karlovac



Graf 5. Promjena tlaka zraka s visinom 8.3.2023. u 17:00h Karlovac

Graph 5 Change in air pressure with altitude 3/8/2023 at 17:00, Karlovac



Graf 6. Promjena relativne vlažnosti zraka s visinom 8.3.2023. u 17:00h Karlovac

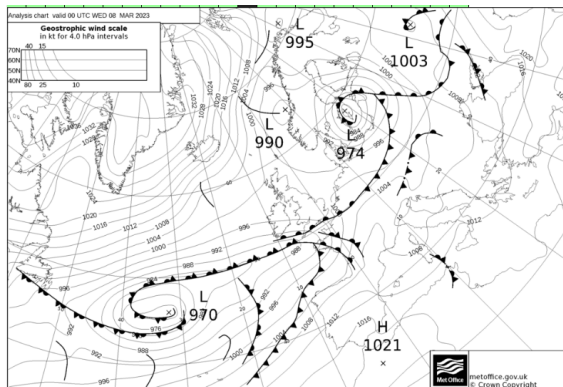
Graph 6 Change in relative air humidity with altitude 3/8/2023 at 17:00, Karlovac



Slika 9. Dimna perjanica Gradske toplane Karlovac, 8.3.2023.

Figure 9 Smoke plume of Karlovac City Heating Plant, 3/8/2023

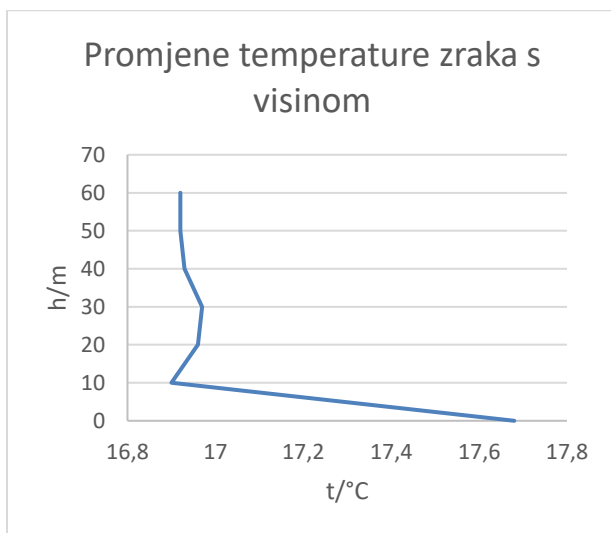
Iz drugog slučaja vidimo da tlak zraka konstantno opada s visinom, ne vidi se izražen eksponencijalni pad. Relativna vlažnost zraka je u padu svih 50 m, ali pad nije linearan. Temperatura zraka opada s visinom, prosječni vertikalni temperaturni gradijent u promatranom sloju iznosi $-0,16^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ili $-0,016/10\text{m}$. Zbog tehničkih razloga nismo mogli letjeti na većim visinama te ne možemo vidjeti kako se temperatura ponaša iznad 70 metara. Ipak, slika 10. nam pokazuje uzdizanje dima iz dimnjaka pa pretpostavljamo da je temperatura s visinom i dalje opadala u atmosferi.



Slika 10. Sinoptička karta, 8.3.2023.

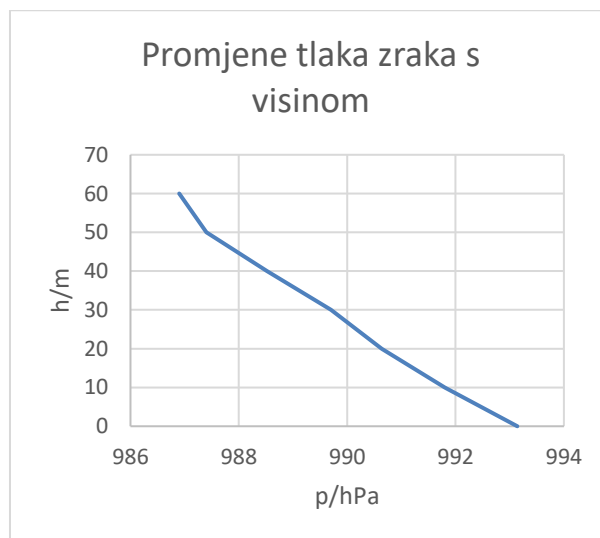
Figure 10 Synoptic map, 3/8/2023

3. Mjerenje, 9.3.2023. 17:00h, visina 60 metara



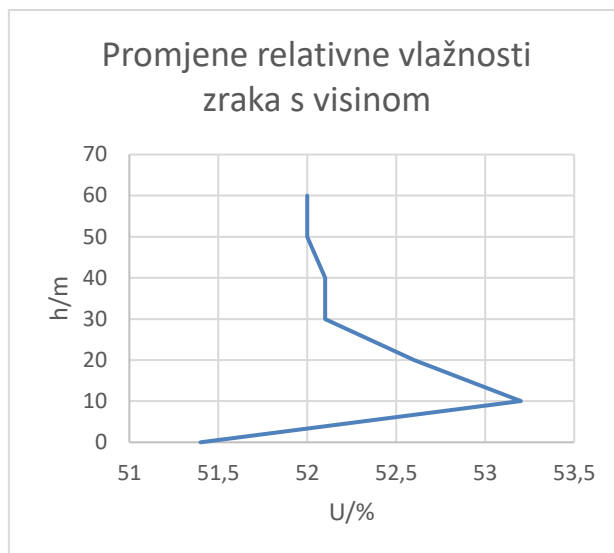
Graf 7. Promjena temperature zraka s visinom 9.3.2023. u 17:00 Karlovac

Graph 7 Change in air temperature with altitude 3/9/2023 at 17:00, Karlovac



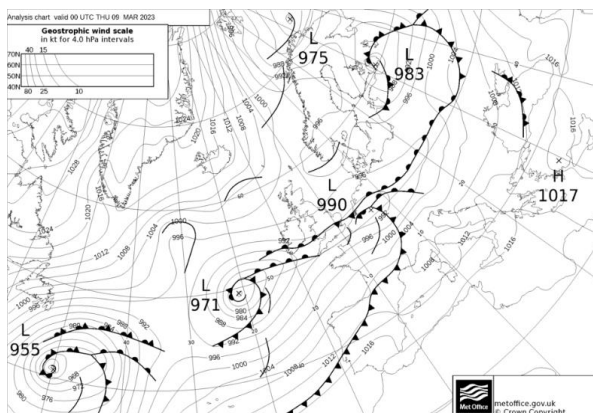
Graf 8. Promjena tlaka zraka s visinom 9.3.2023. u 17:00 Karlovac

Graph 8 Change in air pressure with altitude 3/9/2023 at 17:00, Karlovac



Graf 9. Promjena relativne vlažnosti zraka s visinom 9.3.2023. u 17:00 Karlovac
Graph 9 Change in relative air humidity with altitude 3/9/2023 at 17:00, Karlovac

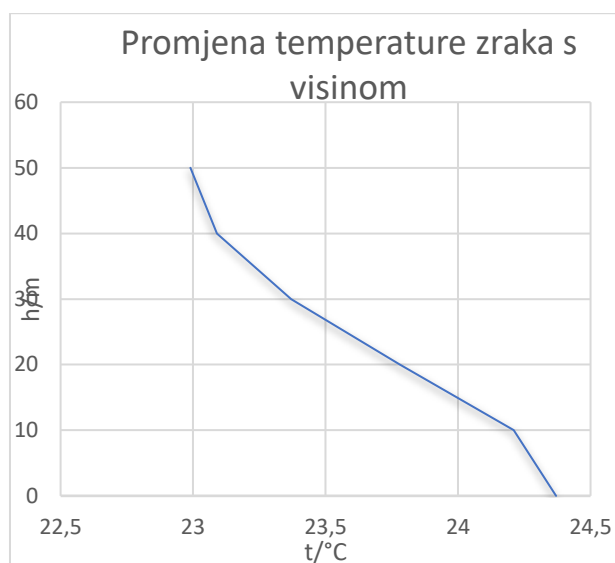
U trećem slučaju vidimo da tlak zraka opada s visinom, ne vidi se izražen eksponencijalni pad. Relativna vlažnost zraka je u porastu prvih 10 m, a zatim u nepravilnom padu idućih 50 m. Temperatura zraka opada s visinom, prosječni vertikalni temperaturni gradijent u promatranom sloju iznosi $-1,27^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ili $-0,127/10\text{m}$. Vidimo da u sloju od 10 do 20 m imamo blagu inverziju temperature, a od 20 do 30 m izotermiju (područje gdje je temperatura stalna). Zbog tehničkih razloga nismo mogli letjeti na većim visinama. Nažalost u tom terminu nije bilo dima iz dimnjaka, pretpostavljamo zbog relativno visokih temperatura za ovo doba godine u svrhu uštede energije. Atmosfera je u promatranom sloju bila nestabilna. Sa slike 11 vidimo da je Karlovac bio pod utjecajem niskog polja tlaka zraka za sva tri promatrana dana.



Slika 11. Sinoptička karta, 9.3.2023.

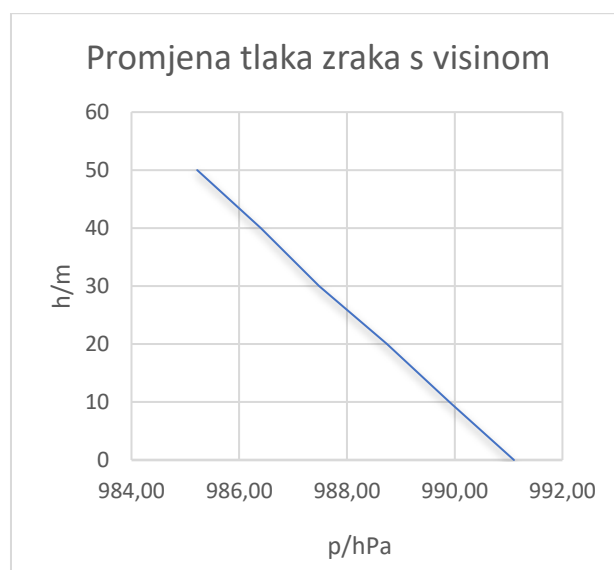
Figure 11 Synoptic map, 3/9/2023

4. Mjerenje, 14.3.2023. 12:00h, visina 50 metara



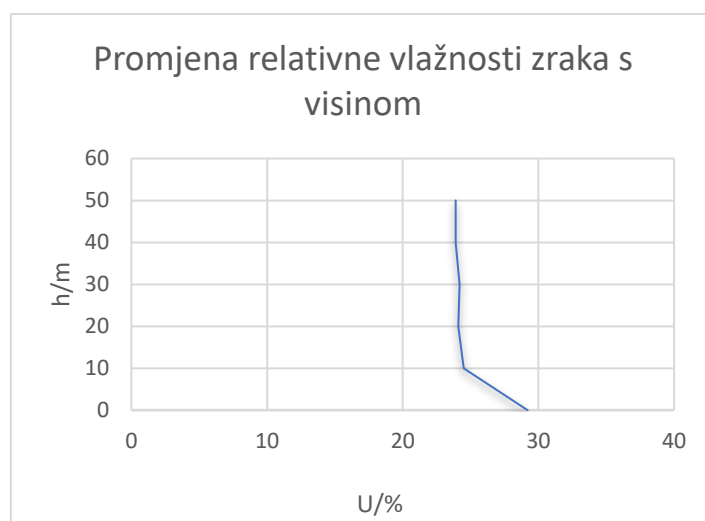
Graf 10. Promjena temperature zraka s visinom 14.3.2023. u 12:00, Karlovac

Graph 10 Change in air temperature with altitude 3/14/2023 at 12:00, Karlovac



Graf 11. Promjena tlaka zraka s visinom 14.3.2023. u 12:00, Karlovac

Graph 11 Change in air pressure with altitude 3/14/2023 at 12:00, Karlovac

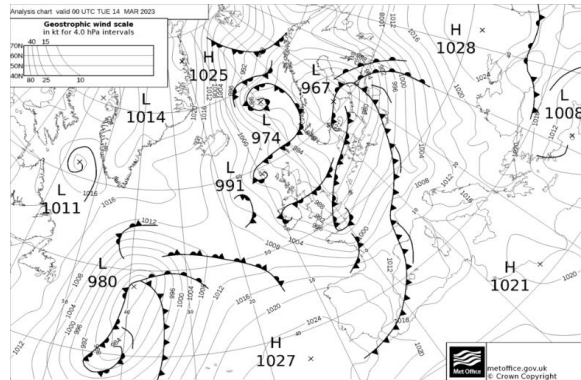


Graf 12. Promjena relativne vlažnosti zraka s visinom 14.3.2023. u 12:00 Karlovac

Graph 12 Change in relative air humidity with altitude 3/14/2023 at 12:00, Karlovac

U četvrtom slučaju vidimo da tlak zraka opada s visinom. Relativna vlažnost zraka je u padu prvih 10 m, a zatim je manje-više stalna u preostalih 40m. Temperatura zraka opada s visinom, prosječni vertikalni temperaturni gradijent u promatranom sloju iznosi $-2,76^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ili $-0,276/10\text{m}$. Toga dana nije bilo temperaturne inverzije. Zbog tehničkih razloga nismo mogli letjeti na većim visinama. Nažalost u tom terminu nije bilo dima iz dimnjaka, pretpostavljamo zbog relativno visokih temperatura za ovo doba godine u svrhu uštede energije. Atmosfera je

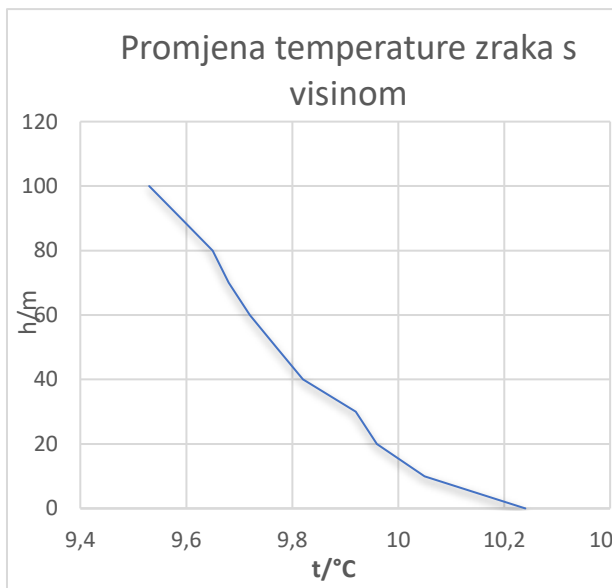
u promatranom sloju bila nestabilna, zbog dolaženja hladne fronte sa sjevera. Sa slike 12 vidimo da je Karlovac bio pod utjecajem niskog polja tlaka zraka za sva tri promatrana dana.



Slika 12. Sinoptička karta, 14.3.2023.

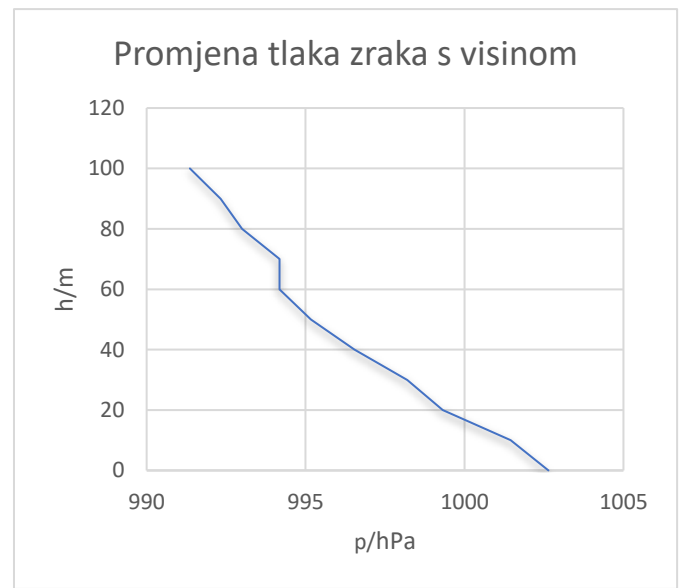
Figure 12 Synoptic map, 3/14/2023

5. Mjerenje, 15.3.2023. 12:00h, visina 100 metara



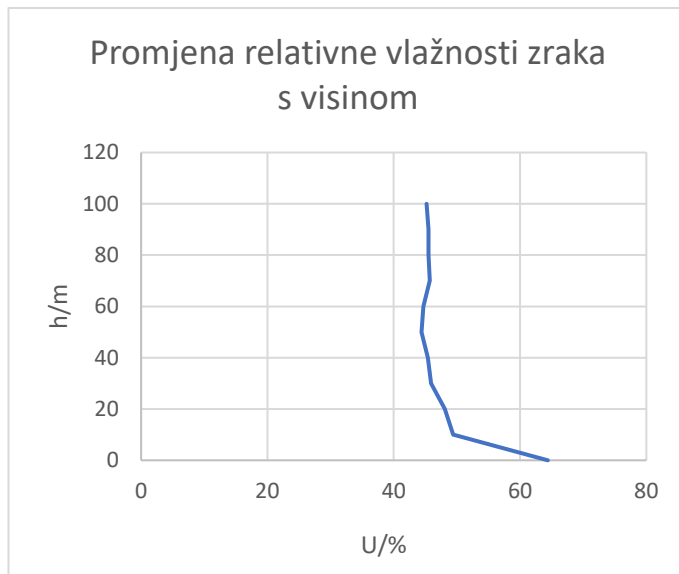
Graf 13. Promjena temperature zraka s visinom 15.3.2023. u 17:00, Karlovac

Graph 13 Change in air temperature with altitude 3/15/2023 at 17:00, Karlovac



Graf 14. Promjena tlaka zraka s visinom 15.3.2023. u 17:00, Karlovac

Graph 14 Change in air pressure with altitude 3/15/2023 at 17:00, Karlovac



Graf 15. Promjena relativne vlažnosti zraka s visinom 15.3.2023. u 17:00 Karlovac

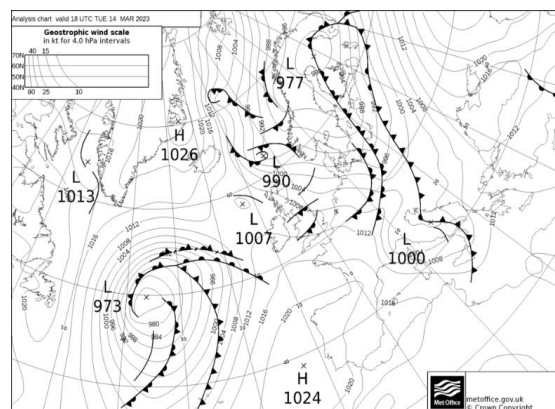
Graph 15 Change in relative air humidity with altitude 3/15/2023 at 17:00, Karlovac



Slika 13. Dimna perjanica Gradske toplane Karlovac, 15.3.2023.

Figure 13 Smoke plume of Karlovac City Heating Plant, 3/15/2023

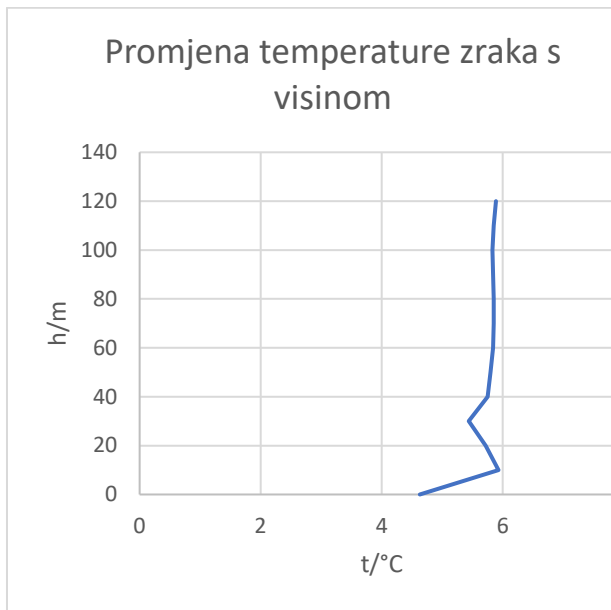
U petom slučaju vidimo da tlak zraka opada s visinom do 60 m, a zatim je sljedećih 10 m stalan i onda dalje nastavlja padati. Relativna vlažnost zraka je u padu prvih 10 m, a zatim u nepravilnom padu idućih 90 m, uz blagu inverziju od 50 do 70 m. Temperatura zraka opada s visinom, prosječni vertikalni temperaturni gradijent u promatranom sloju iznosi $-0,71^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ili $-0,071/10\text{m}$. Toga dana nije bilo temperaturne inverzije ili izotermije. Dimna perjanica se diže vertikalno u vis. Atmosfera je u promatranom sloju bila nestabilna. Sa slike 14 vidimo da je Karlovac bio pod utjecajem niskog polja tlaka zraka.



Slika 14. Sinoptička karta, 15.3.2023.

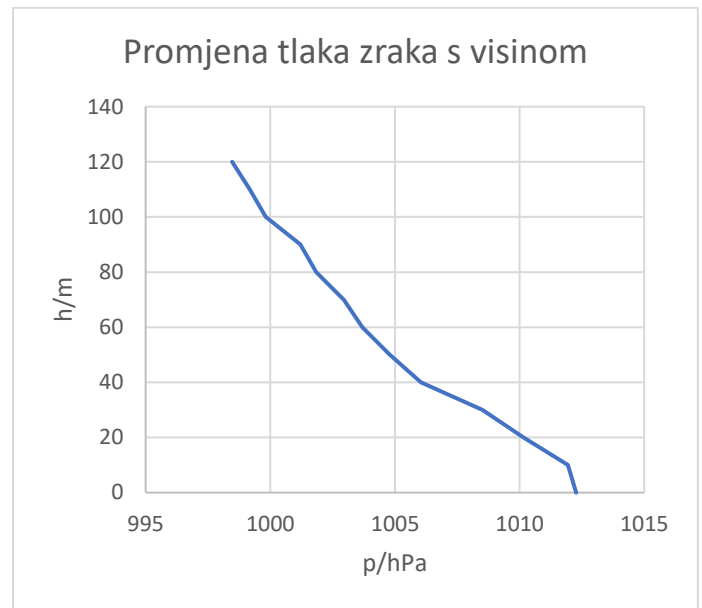
Figure 14 Synoptic map, 3/15/2023

6. Mjerenje, 16.3.2023. 12:00h, visina 120 metara



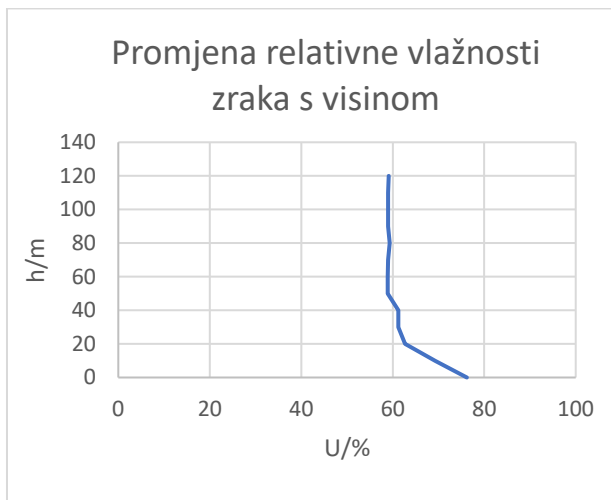
Graf 16. Promjena temperature zraka s visinom 16.3.2023. u 10:00, Karlovac

Graph 16 Change in air temperature with altitude 3/16/2023 at 10:00, Karlovac



Graf 17. Promjena tlaka zraka s visinom 16.3.2023. u 10:00, Karlovac

Graph 17 Change in air pressure with altitude 3/16/2023 at 10:00, Karlovac



Graf 18. Promjena relativne vlažnosti zraka s visinom 16.3.2023. u 10:00, Karlovac

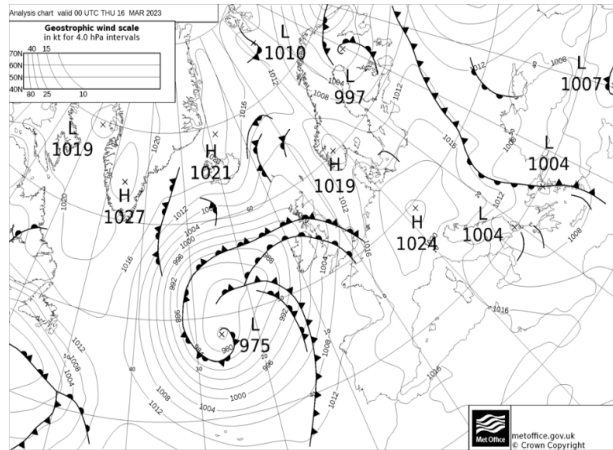
Graph 18 Change in relative air humidity with altitude 3/16/2023 at 10:00, Karlovac



Slika 15. Dimna perjanica Gradske toplane Karlovac, 16.3.2023.

Figure 15 Smoke plume of Karlovac City Heating Plant, 3/16/2023

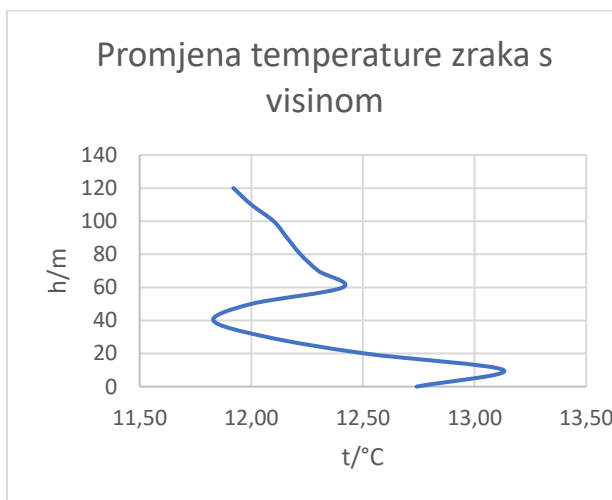
U šestom slučaju vidimo da tlak zraka opada s visinom. Relativna vlažnost zraka je u padu prvih 20 m, a zatim je u nekom blagom padu ili u inverziji preostalih 100 m. Temperatura zraka toga dana bila je izražena inverzijama. Prva je između 0 i 10 m, druga između 30 i 40 m, nešto blage inverzije imamo pri vrhu. Prosječni vertikalni temperaturni gradijent u promatranom sloju iznosi $+1,05^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ili $+0,105/10\text{m}$. Dimna perjanica se diže vertikalno prvih 20ak metara te se rasteže u dimnu zavjesu. Atmosfera je u promatranom sloju bila nestabilna. Sa slike 16 vidimo da je Karlovac bio pod utjecajem ciklone (niskog polja tlaka zraka).



Slika 16. Sinoptička karta, 16.3.2023.

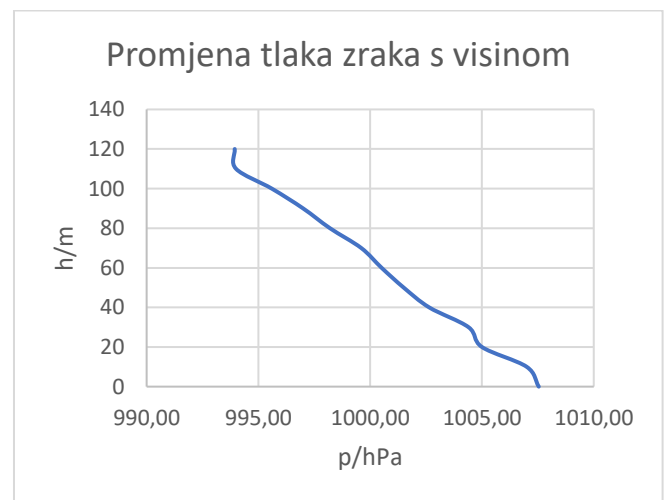
Figure 16 Synoptic map, 3/16/2023

6. Mjerenje, 20.3.2023. 17:00h, visina 120 metara



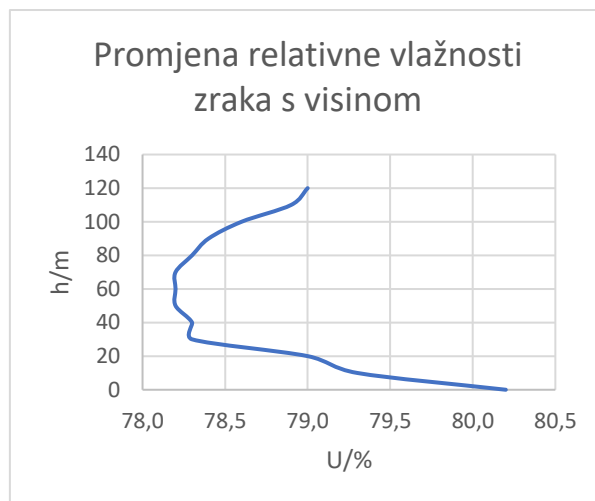
Graf 19. Promjena temperature zraka s visinom 20.3.2023. u 17:00, Karlovac

Graph 19 Change in air temperature with altitude 3/20/2023 at 17:00, Karlovac



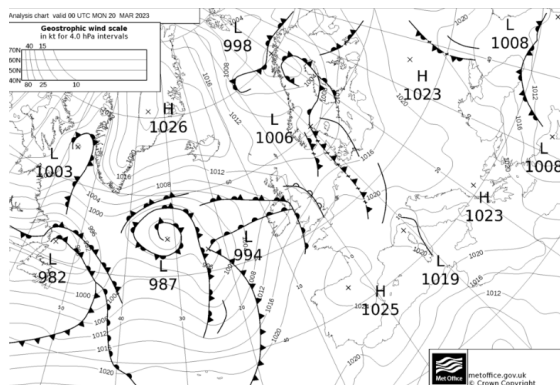
Graf 20. Promjena tlaka zraka s visinom 20.3.2023. u 17:00, Karlovac

Graph 20 Change in air pressure with altitude 3/20/2023 at 17:00, Karlovac



Graf 21. Promjena relativne vlažnosti zraka s visinom 20.3.2023. u 17:00, Karlovac
 Graph 21 Change in relative air humidity with altitude 3/20/2023 at 17:00, Karlovac

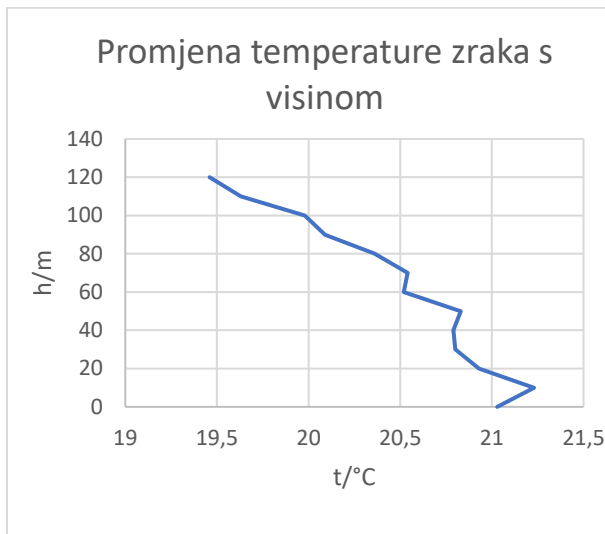
U sedmom slučaju vidimo da tlak zraka opada s visinom uz blagu inverziju između 110 i 120 m. Relativna vlažnost zraka je u padu prvih 30 m, a zatim imamo dosta izraženu inverziju od 70 do 120 m. Temperatura zraka opada s visinom, prosječni vertikalni temperaturni gradijent u promatranom sloju iznosi $-0,68^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ ili $-0,068/10\text{ m}$. Nažalost u tom terminu nije bilo dima iz dimnjaka, pretpostavljamo zbog relativno visokih temperatura za ovo doba godine u svrhu uštede energije. Atmosfera je u promatranom sloju bila stabilna. Sa slike 17 vidimo da je Karlovac bio pod utjecajem visokog polja tlaka zraka.



Slika 17. Sinoptička karta, 20.3.2023.

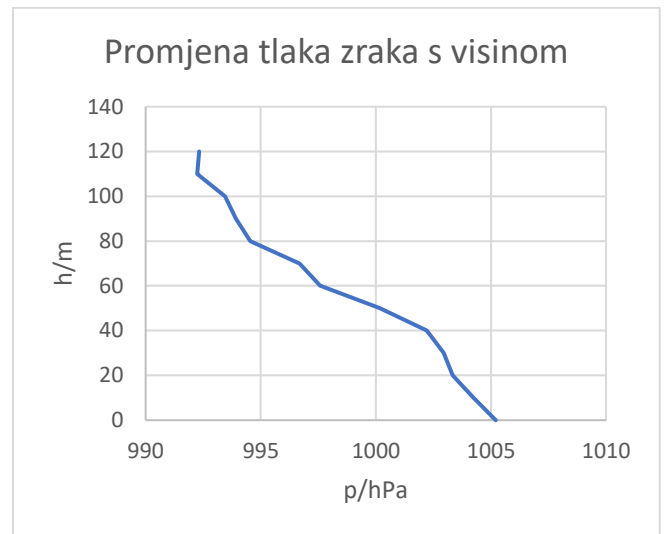
Figure 17 Synoptic map, 3/20/2023

8. Mjerenje, 21.3.2023. 13:00h, visina 120 metara



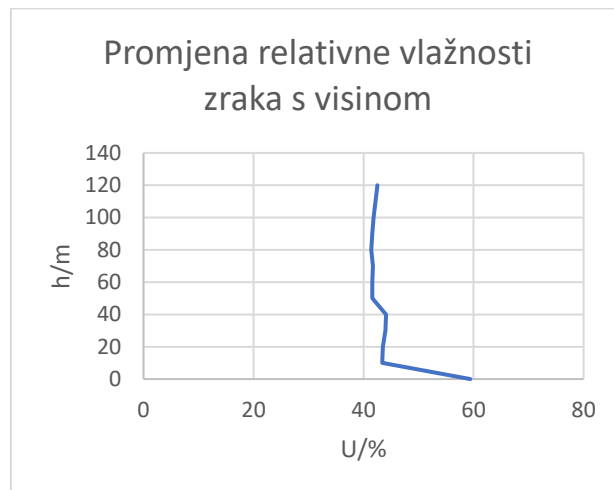
Graf 22. Promjena temperature zraka s visinom 21.3.2023. u 13:00, Karlovac

Graph 22 Change in air temperature with altitude 3/21/2023 at 13:00, Karlovac



Graf 23. Promjena tlaka zraka s visinom 21.3.2023. u 13:00, Karlovac

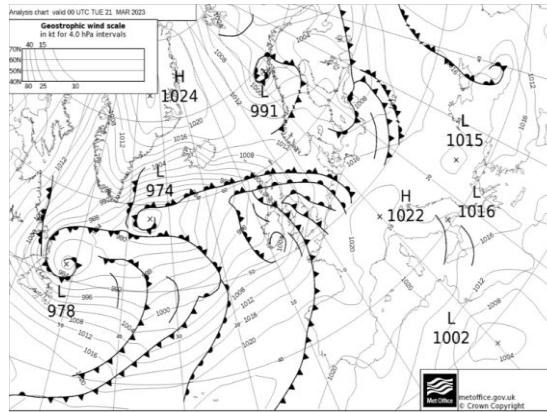
Graph 23 Change in air pressure with altitude 3/21/2023 at 13:00, Karlovac



Graf 24. Promjena relativne vlažnosti zraka s visinom 21.3.2023. u 13:00, Karlovac

Graph 24 Change in relative air humidity with altitude 3/21/2023 at 13:00, Karlovac

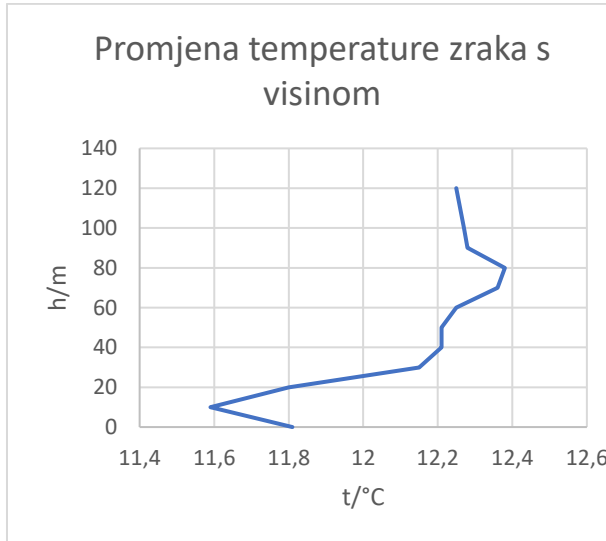
U osmom slučaju vidimo da tlak zraka opada s visinom, tek blagu inverziju imamo između 110 i 120 m. Relativna vlažnost zraka je u padu prvih 10 m, zatim u preostalih 100 m imamo blagi pad relativne vlažnosti zraka i blagu inverziju. Temperatura zraka opada s visinom, no i tu imamo temperaturne inverzije između 0 do 10 m, 40 do 50 m i 60 do 70 m. Prosječni vertikalni temperaturni gradijent u promatranom sloju iznosi $+1,3^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ili $+0,13/10\text{m}$. Nažalost u tom terminu nije bilo dima iz dimnjaka, pretpostavljamo zbog relativno visokih temperatura za ovo doba godine u svrhu uštede energije. Atmosfera je u promatranom sloju bila stabilna. Sa slike 18 vidimo da je Karlovac bio pod utjecajem visokog polja tlaka zraka.



Slika 18. Sinoptička karta, 21.3.2023

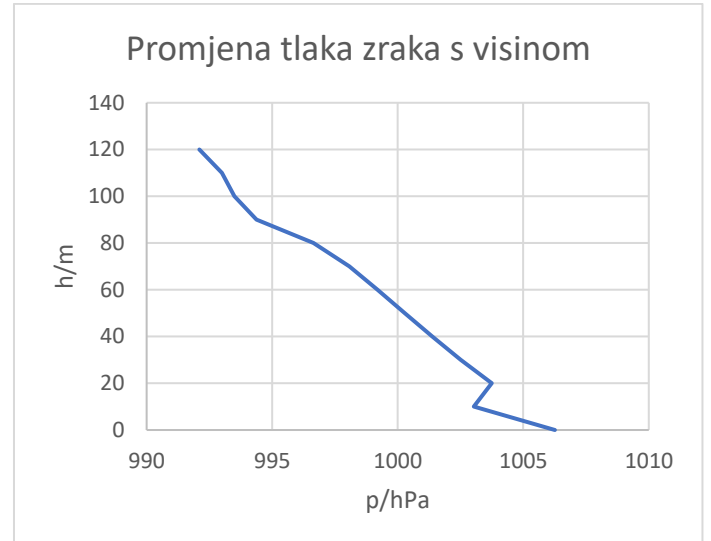
Figure 18 Synoptic map, 3/21/2023

9. Mjerenje, 22.3.2023. 09:00h, visina 120 metara



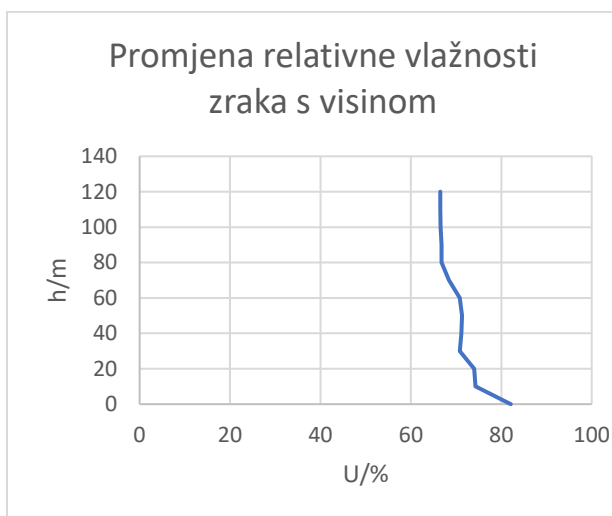
Graf 25. Promjena temperature zraka s visinom 22.3.2023. u 09:00, Karlovac

Graph 25 Change in air temperature with altitude 3/22/2023 at 09:00, Karlovac



Graf 26. Promjena tlaka zraka s visinom 22.3.2023. u 09:00, Karlovac

Graph 26 Change in air pressure with altitude 3/22/2023 at 09:00, Karlovac



Graf 27. Promjena relativne vlažnosti zraka s visinom 22.3.2023. u 09:00, Karlovac

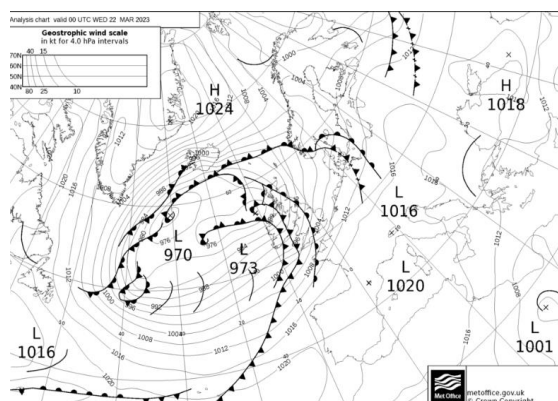
Graph 27 Change in relative air humidity with altitude 3/22/2023 at 09:00, Karlovac



Slika 19. Dimna perjanica Gradske toplane Karlovac, 22.3.2023.

Figure 19 Smoke plume of Karlovac City Heating Plant, 3/22/2023

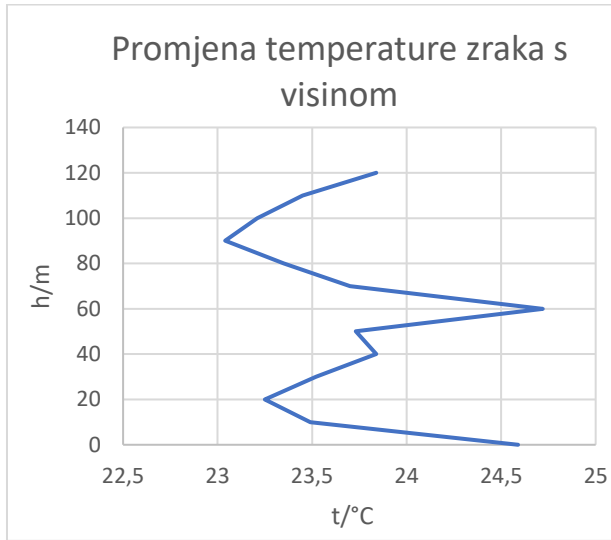
U devetom slučaju vidimo da tlak zraka opada s visinom uz inverziju od 10 do 20 m. Relativna vlažnost zraka blago opada s visinom uz blagu inverziju od 30 do 50 m. Toga dana smo imali izraženu temperaturnu inverziju. Najprije je temperaturna počela opadati s visinom do 10 m. Zatim je nastupila temperaturna inverzija od 20 do 80m, te na kraju počinje temperatura padati od 90 do 120 m. Prosječni vertikalni temperaturni gradijent u promatranom sloju iznosi $+0,37^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ili $+0,037/10\text{m}$. Atmosfera je u promatranom sloju bila nestabilna. Sa slike 20 vidimo da je Karlovac bio pod utjecajem visinske ciklone čiji se centar nalazio u Sloveniji. Dimna perjanica se uzdiže vertikalno u vis prvih 40ak metara od vrha dimnjaka a zatim stvara horizontalnu traku.



Slika 20. Sinoptička karta, 22.3.2023

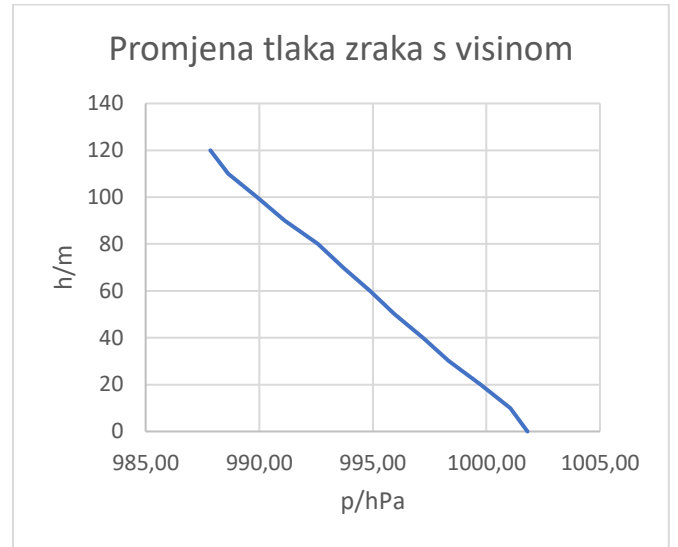
Figure 20 Synoptic map, 3/22/2023

10. Mjerenje, 23.3.2023. 13:00h, visina 120 metara



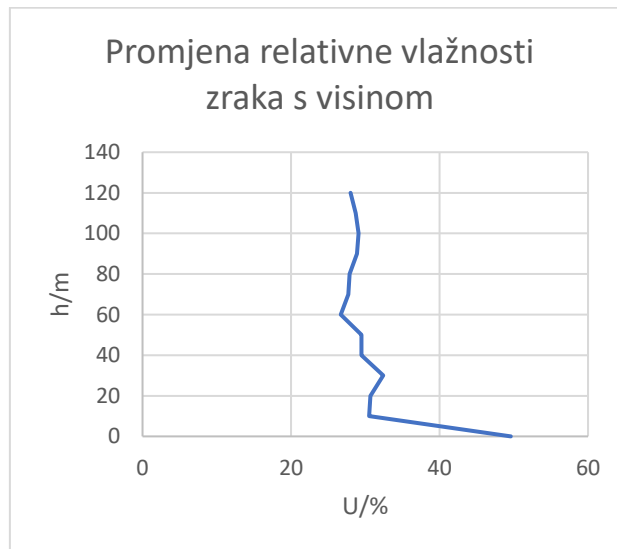
Graf 28. Promjena temperature zraka s visinom 23.3.2023. u 13:00, Karlovac

Graph 28 Change in air temperature with altitude 3/23/2023 at 13:00, Karlovac



Graf 29. Promjena tlaka zraka s visinom 23.3.2023. u 13:00, Karlovac

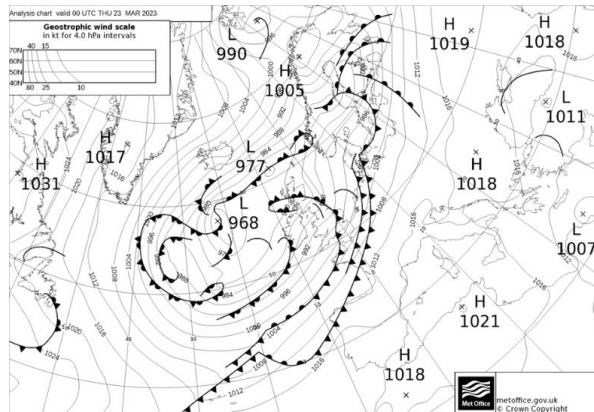
Graph 29 Change in air pressure with altitude 3/23/2023 at 13:00, Karlovac



Graf 30. Promjena relativne vlažnosti zraka s visinom 23.3.2023. u 13:00, Karlovac

Graph 30 Change in relative air humidity with altitude 3/23/2023 at 13:00, Karlovac

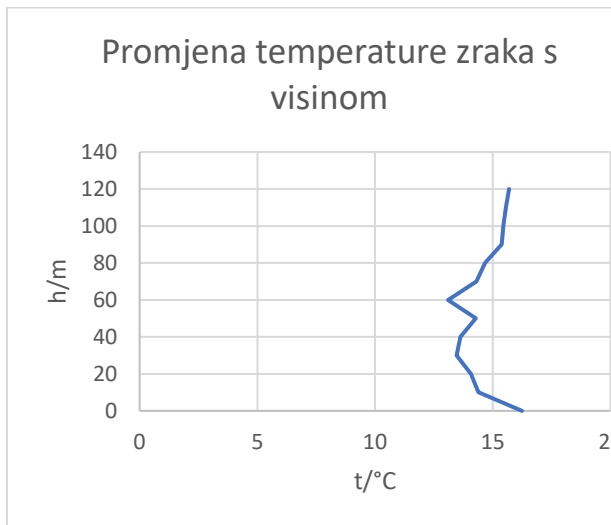
U desetom slučaju vidimo da tlak zraka opada s visinom. Relativna vlažnost zraka je u padu prvih 10 m, a zatim imamo blagi pad uz blage inverzije. I toga dana smo imali dosta izražene temperaturne inverzije. Temperatura zraka je počela opadati s visinom do 20 m. Zatim se pojavila temperaturna inverzija od 20 do 60 m. Od 60 do 90 m temperatura zraka naglo je pala za više od 1°C. I ponovno imamo inverziju od 90 do 120 m. Prosječni vertikalni temperaturni gradijent u promatranom sloju iznosi $-0,63^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ili $-0,063/10\text{m}$. Nažalost u tom terminu nije bilo dima iz dimnjaka, pretpostavljamo zbog relativno visokih temperatura za ovo doba godine u svrhu uštede energije. Atmosfera je u promatranom sloju bila stabilna. Sa slike 21 vidimo da je Karlovac bio pod utjecajem visokog polja tlaka zraka.



Slika 21. Sinoptička karta, 23.3.2023

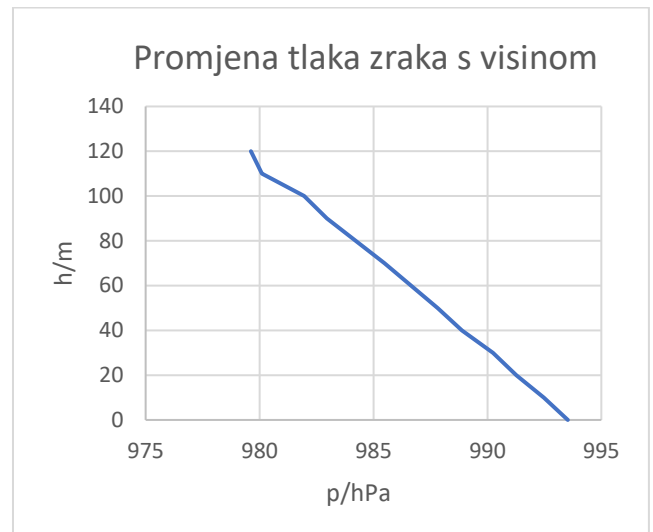
Figure 21 Synoptic map, 3/23/2023

11. Mjerenje, 27.3.2023. 13:00h, visina 120 metara



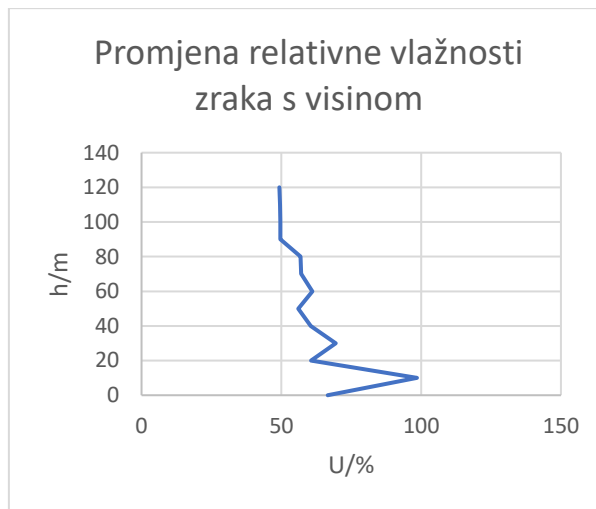
Graf 31. Promjena temperature zraka s visinom 27.3.2023. u 13:00, Karlovac

Graph 31 Change in air temperature with altitude 3/27/2023 at 13:00, Karlovac



Graf 32. Promjena tlaka zraka s visinom 27.3.2023. u 13:00, Karlovac

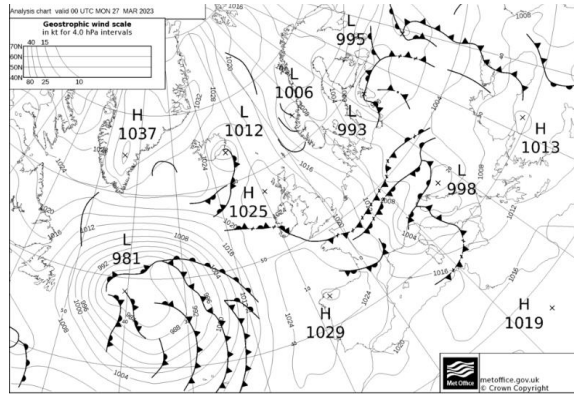
Graph 32 Change in air pressure with altitude 3/27/2023 at 13:00, Karlovac



Graf 33. Promjena relativne vlažnosti zraka s visinom 27.3.2023. u 13:00, Karlovac

Graph 33 Change in relative air humidity with altitude 3/27/2023 at 13:00, Karlovac

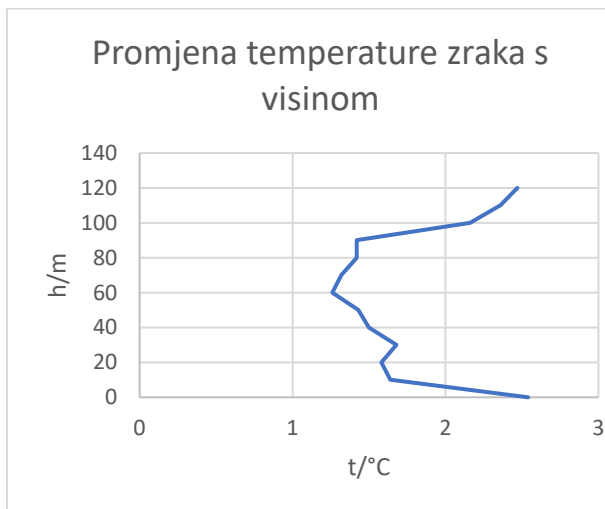
U jedanaestom slučaju vidimo da tlak zraka opada s visinom. Relativna vlažnost zraka je u porastu prvih 10 m, a zatim u nepravilnom padu idućih 110 m. Temperatura zraka opada s visinom do 30 m. Zatim do 120 m imamo blage inverzije. Prosječni vertikalni temperaturni gradijent u promatranom sloju iznosi $-0,46^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ili $-0,046/10\text{m}$. Nažalost u tom terminu nije bilo dima iz dimnjaka, pretpostavljamo zbog relativno visokih temperatura za ovo doba godine u svrhu uštede energije. Atmosfera je u promatranom sloju bila nestabilna. Sa slike 22 vidimo da je Karlovac bio pod utjecajem niskog polja tlaka zraka .



Slika 22. Sinoptička karta, 27.3.2023

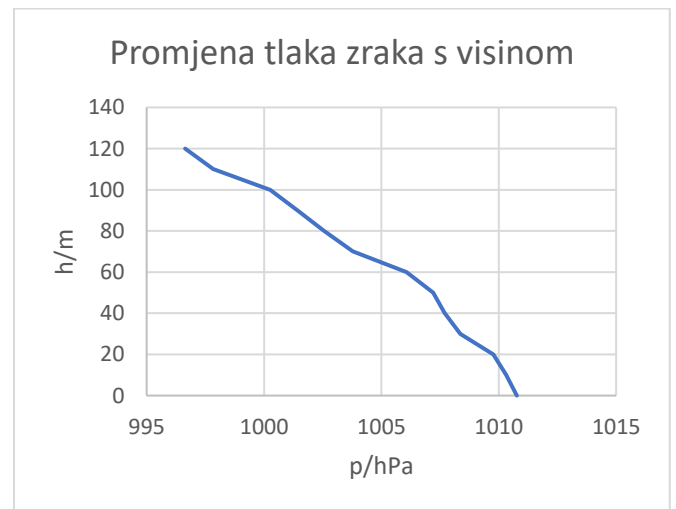
Figure 22 Synoptic map, 3/27/2023

12. Mjerenje, 28.3.2023. 08:00h, visina 120 metara



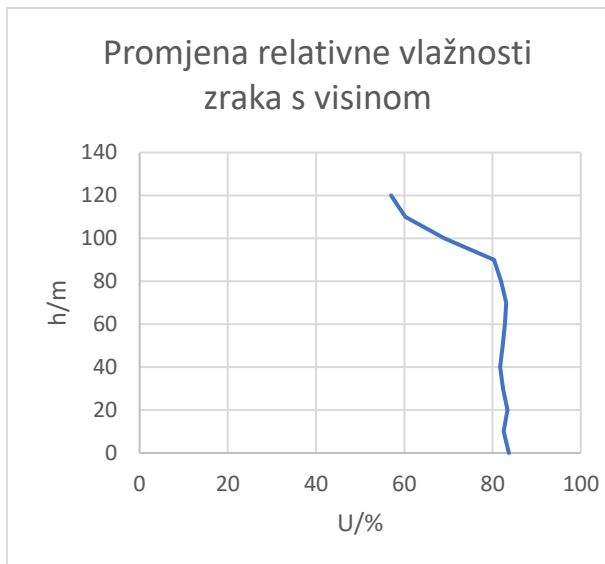
Graf 34. Promjena temperature zraka s visinom 28.3.2023. u 08:00, Karlovac

Graph 34 Change in air temperature with altitude 3/28/2023 at 08:00, Karlovac



Graf 35. Promjena tlaka zraka s visinom 28.3.2023. u 08:00, Karlovac

Graph 35 Change in air pressure with altitude 3/28/2023 at 08:00, Karlovac



Graf 36. Promjena relativne vlažnosti zraka s visinom 28.3.2023. u 08:00, Karlovac

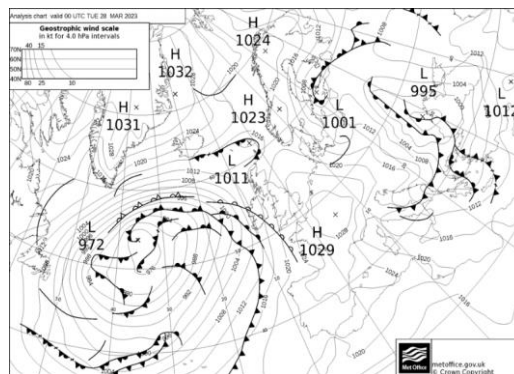
Graph 36 Change in relative air humidity with altitude 3/28/2023 at 08:00, Karlovac



Slika 24. Dimna perjanica Gradske toplane Karlovac, 28.3.2023.

Figure 24 Smoke plume of Karlovac City Heating Plant, 3/28/2023

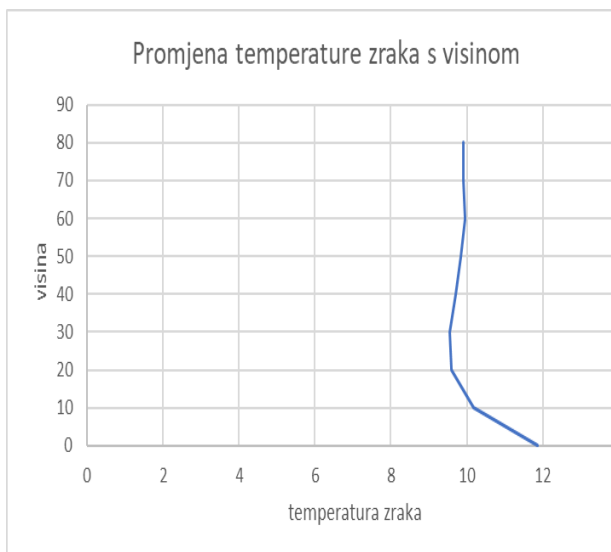
U dvanaestom slučaju vidimo da tlak zraka opada s visinom. Relativna vlažnost zraka skoro pa statična prvih 9 m, a zatim u padu idućih 30 m. Temperatura zraka opada s visinom prvih 10m. Zatim imamo nepravilan pad temperature uz blage inverzije i izotermije do 90 m. Od 90 do 120 m počinje temperatura rasti s visinom. Prosječni vertikalni temperaturni gradijent u promatranom sloju iznosi $-0,06^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ili $-0,006/10\text{m}$. Atmosfera je u promatranom sloju bila nestabilna. Sa slike 23 vidimo da je Karlovac bio pod utjecajem niskog polja tlaka zraka za sva tri promatrana dana. Dimna perjanica se uzdiže vertikalno u vis.



Slika 23. Sinoptička karta, 28.3.2023

Figure 23 Synoptic map, 3/28/2023

13. Mjerenje, 3.4.2023. 12:00h, visina 80 metara



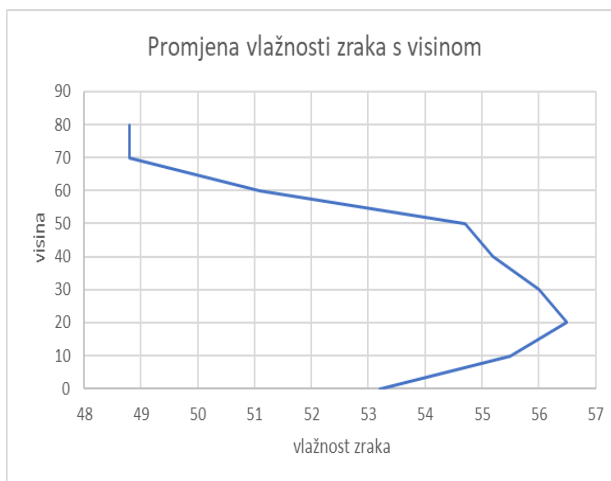
Graf 37. Promjena temperature zraka s visinom 3.4.2023. u 12:00, Karlovac

Graph 37 Change in air temperature with altitude 4/3/2023 at 12:00, Karlovac



Graf 38. Promjena tlaka zraka s visinom 3.4.2023. u 12:00, Karlovac

Graph 38 Change in air pressure with altitude 4/3/2023 at 12:00, Karlovac



Graf 39. Promjena relativne vlažnosti zraka s visinom 3.4.2023. u 12:00, Karlovac

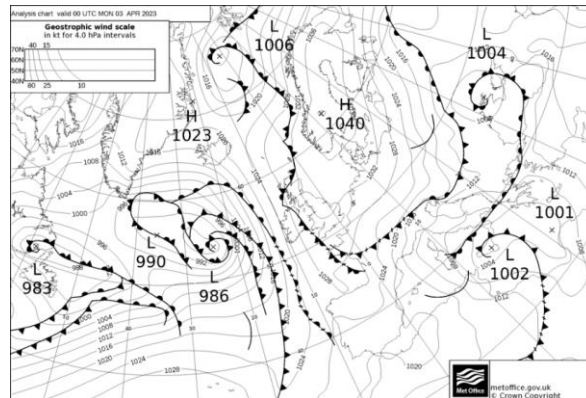
Graph 39 Change in relative air humidity with altitude 4/3/2023 at 12:00, Karlovac



Slika 25. Dimna perjanica Gradske toplane Karlovac, 3.4.2023.

Figure 25 Smoke plume of Karlovac City Heating Plant, 4/3/2023

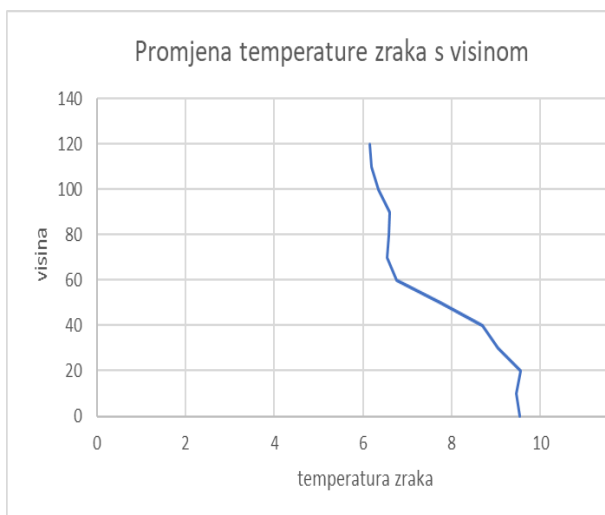
U trinaestom slučaju vidimo da tlak zraka opada s visinom. Relativna vlažnost zraka je u porastu prvih 20 m, a zatim padu idućih 40 m. Temperatura zraka opada s visinom prvih 20 m. Zatim imamo blagu inverziju od 30 do 60 m, te izotermiju zadnjih 10 m. Prosječni vertikalni temperaturni gradijent u promatranom sloju iznosi $-2,84^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ili $-0,284/10\text{m}$. Zbog tehničkih razloga nismo mogli letjeti na većim visinama. Atmosfera je u promatranom sloju bila nestabilna. Dimna perjanica uzdiže se vertikalno u vis. Sa slike 26 vidimo da je Karlovac bio pod utjecajem tople fronte.



Slika 26. Sinoptička karta, 3.4.2023

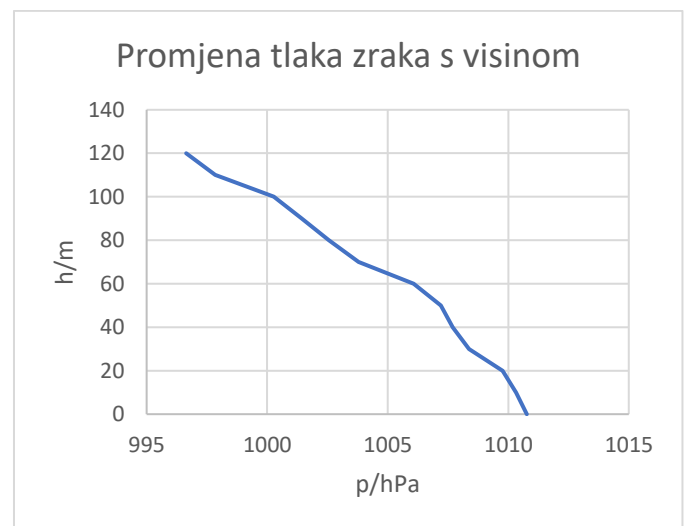
Figure 26 Synoptic map, 4/3/2023

14. Mjerenje, 4.4.2023. 16:30h, visina 120 metara



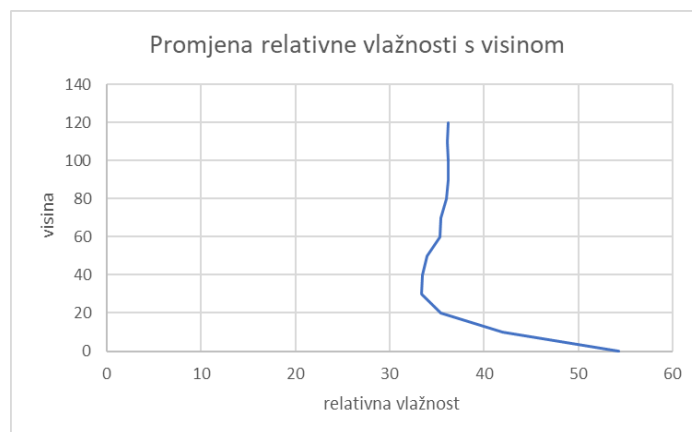
Graf 40. Promjena temperature zraka s visinom 4.4.2023. u 16:30, Karlovac

Graph 40 Change in air temperature with altitude 4/4/2023 at 16:30, Karlovac



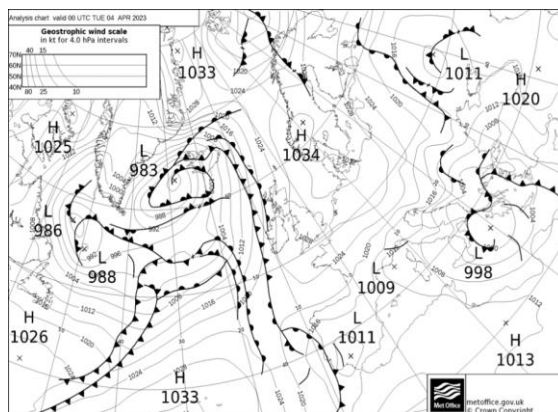
Graf 41. Promjena tlaka zraka s visinom 4.4.2023. u 16:30, Karlovac

Graph 41 Change in air pressure with altitude 4/4/2023 at 16:30, Karlovac



Graf 42. Promjena relativne vlažnosti zraka s visinom 4.4.2023. u 16:30, Karlovac
 Graph 42 Change in relative air humidity with altitude 4/4/2023 at 16:30, Karlovac

U četrnaestom slučaju vidimo da tlak zraka opada s visinom. Relativna vlažnost zraka je u padu prvih 30 m, a zatim u nepravilnom rastu idućih 90 m. Do visine 20 m imamo blagi pad temperature zraka i blagu inverziju. Zatim temperatura zraka opada do 70 m, gdje do 90 m imamo ponovno blagu inverziju. I na kraju temperatura zraka opada do 120 m. Prosječni vertikalni temperaturni gradijent u promatranom sloju iznosi $-2,83^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ili $-0,283/10\text{m}$. Vidimo da u sloju od 10 do 20 m imamo blagu inverziju temperature, a od 20 do 30 m izotermiju. Atmosfera je u promatranom sloju bila stabilna. Sa slike 27 vidimo da je Karlovac bio pod utjecajem visokog polja tlaka zraka.



Slika 27. Sinoptička karta, 4.4.2023
 Figure 27 Synoptic map, 4/4/2023

Tablica 1. Prosječni vertikalni temperaturni gradijent u Karlovcu (do 120m) i Zagrebu – Maksimir (do 1000m)

Table 1. Average vertical temperature gradient in Karlovac (up to 120m) and Zagreb – Maksimir (up to 1000m)

Broj slučajeva	Datum	Karlovac [°C/100m]	Zagreb – Maksimir [°C/100m]
1.	21.3.2023.	+1,3	-0,95
2.	27.3.2023.	-0,46	-0,88
3.	28.3.2023.	-0,06	-1,11
4.	3.4.2023.	+2,84	-1,03

Tablica 2. Prosječni vertikalni temperaturni gradijent u Karlovcu (do 120m) i izgled dimne perjanice

Table 2. Average vertical temperature gradient in Karlovac (up to 120m) and smoke plume appearance

Broj slučajeva	Datum 2023.	Karlovac [°C/100m]	Izgled dimne perjanice
1.	7.3.	-0,25	Vertikalno u vis
2.	8.3.	-0,16	Vertikalno u vis
3.	15.3.	-0,71	Vertikalno u vis
4.	16.3.	+1,05	Verikalno, zavjesa
5.	22.3	+0,37	Vertikalno, zavjesa
6.	28.3	-0,06	Vertikalno u vis
7.	3.4	-2,84	Vertikalno u vis

Rasprava i zaključci

S obzirom na ograničenje mjerenja u smislu visine, vremenskih uvjeta za mogućnost letenja dronom, naša mjerenja su bila u rasponu od 60 m do 120 m. Takva mjerenja su bila dovoljna da bi analizirali utjecaj meteoroloških veličina na izgled dimne perjanice. Generalno, nemamo velik broj mjerenja, pogotovo da bi mogli analizirati sve naše postavljene hipoteze. Ipak i s ovakvim brojem mjerenja možemo ponešto zaključiti vezano uz postavljene hipoteze. Hipotezu 1. odbacujemo jer na grafovima se jasno vidi kako nema linearnog opadanja vlažnosti s visinom. Hipoteza 2. nije potvrđena, jer se ne vidi očiti eksponencijalni pad tlaka, tlak prema očekivanju opada s visinom, ali eksponencijalni pad nije sasvim očit što se i vidi iz svakog priloženog grafa s tlakom zraka. Što se tiče hipoteza vezanih za temperaturu zraka, hipotezu 3.1 ne možemo prihvatiti (temperatura zraka će u prosjeku opadati s visinom $-0,56^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$), ali prosječni temperaturni gradijent na naših trinaest slučajeva iznosi $-0,82^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ što ukazuje da temperatura u prosjeku opada s visinom, a odstupanja od vrijednosti $-0,65^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ prije svega pripisujemo malom broju slučajeva te ograničenosti naših mjerenja do samo 120 m visine. Hipoteze 3.2 i 3.3 odbacujemo, iako nemamo velik broj slučajeva, vidimo da promjena temperature s visinom u prizemnom sloju neće imati istu tendenciju vezanu uz pojedini barički sustav. Iako je broj slučajeva relativno mali, hipoteze 4.1 i 4.2 možemo prihvatiti jer se dim dizao vertikalno u vis u svakom slučaju negativnog gradijenta temperature, dok je u dva slučaja s temperaturnom inverzijom dimna perjanica na određenoj visini posustala s podizanjem i počela se širiti u zavjesu (Tablica 2.).

Ovo istraživanje ukazalo je na mnoge nedostatke. Smatramo da su ti nedostaci tj. naš uvid i spoznaja o nedostacima ipak i velika snaga ovog projekta. Uхватili smo se u koštac s vrlo zahtjevnim mjerenjima, te smo ih kroz projekt usavršavali. Sama činjenica da smo uspjeli dobiti i nacrtati vertikalne profile pojedinih atmosferski elemenata, kao i spoznaja o zakonitostima letenja dronom daje nam optimizam za daljnja slična istraživanja. U tom smislu proširenje ovog projekta na veći broj slučajeva sigurno bi dao i bolje rezultate istraživanja, također period za promatranje dimne perjanice svakako treba biti u fokusu od studenog do ožujka jer bi u tom slučaju imali puno veći broj dana s vidljivim dimom, te bi se čak mogla promatrati i na dnevnoj bazi. Usporedba s profesionalnom sondažom nema većeg smisla, jer je visina dron-sondaže premala u usporedbi s profesionalnom koja do visine 120 m ima možda jedno a ponekad ni jedno mjerenje zabilježeno. Smatramo da mjerenja dronom ovakvog tipa, uz sve navedene nedostatke, mogu biti korisna, pogotovo za proučavanje prizemnog graničnog sloja atmosfere. Također smatramo da bi mjerenjima dronom mogli pomoći u kalibraciji satelitskih mjerenja npr. vlažnosti zraka u nižim slojevima atmosfere, naravno svjesni smo da je ova ideja vrlo zahtjevna.

. Ovaj projekt smatramo kao vrlo dobru početnu točku za daljnja istraživanja prizemnih slojeva atmosfere dronom, te ćemo ih kroz nastavu a vjerojatno i kroz neki budući projekt unaprijediti i detaljnije, te na većem broju slučajeva, istražiti.

Literaturni izvori

1. https://meteo.hr/podaci.php?section=podaci_mjerenja¶m=sondaze , 22.12.2022.
2. <https://www.ccaa.hr/> , 02.02.2023.
3. <https://www.conrad.hr/p/yuneec-typhoon-h3-industrijski-dron-rtf-zrakoplovna-kamera-2182531> , 10.02.2023.
4. <https://www.crocontrol.hr/en/> , 08.02.2023.
5. <https://www.wetterzentrale.de/>, 07.03.2023.
6. <https://weather.uwyo.edu/>

