Usporedba daljinskih mjerenja LIDAR-om s in situ mjerenjima ultrazvučnim anemometrom kod zračne luke Dubrovnik

Tašler, Juraj

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:217:934549

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-25**

Repository / Repozitorij:

Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

Juraj Tašler

Usporedba daljinskih mjerenja LIDAR-om s *in situ* mjerenjima ultrazvučnim anemometrom kod zračne luke Dubrovnik

Diplomski rad

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ FIZIKA-GEOFIZIKA

SMJER: METEOROLOGIJA I FIZIČKA OCEANOGRAFIJA

Juraj Tašler

Diplomski rad

Usporedba daljinskih mjerenja LIDAR-om s *in situ* mjerenjima ultrazvučnim anemometrom kod zračne luke Dubrovnik

Voditelj diplomskog rada: Izv. prof. dr. sc. Željko Večenaj

Zagreb, 2024.

Za početak se zahvaljujem svojem mentoru izv. prof. dr. sc. Željku Večenaju na podršci, te odličnim smjernicama i kritikama tijekom pisanja ovog rada. Zahvaljujem se HKZP-u i Geofizičkom odsjeku Prirodoslovno-matematičkog fakulteta u Zagrebu na ustupljenim podacima. Također hvala kolegama Jadranu Jurkoviću, dipl. ing., i Ladi Gabeli, dipl. ing., na odličnim savjetima i komentarima tijekom obrade podataka.

Zahvaljujem se svim svojim prijateljima na velikoj podršci i druženjima tijekom studija. Posebnu zahvalu upućujem djevojci Terezi, te roditeljima Damiru i Arijani koji su u svim trenucima bili uz mene, te su time uvelike pridonijeli mojem uspješnom završetku studija.

Sažetak

Bura je jedan od najsnažnijih i najčešćih tipova vjetra na području istočne obale Jadrana. S obzirom na visinu troposfere do koje prodire, u principu, razlikuju se plitka i duboka bura, dok se po sinoptičkom tipu dijeli na ciklonalni, anticiklonalni i frontalni tip bure. U ovom radu se istraživanje temelji na mjerenjima LIDAR-a i ultrazvučnog anemometra koji su se nalazili u okolici Dubrovačkog aerodroma. Zbog svog položaja, pista zračne luke Dubrovnik je izuzetno otvorena na buru, pa to stvara velike probleme u zračnom prometu. Analiza mjerenja se vršila na dvije epizode bure iz 2018. godine. Za početak je pomoću prizemne sinoptičke karte i vertikalnog profila vjetra određen tip bure za obje epizode. Zatim je napravljena usporedba mjerenja radijalne komponente brzine vjetra između instrumenata. S obzirom da su mjerenja podijeljena u nizove koji traju 1.5 ili 3.6 minuta, tražila se veza između srednje vrijednosti niza mjerenja LIDAR-a i srednje vrijednosti niza mjerenja anemometra. Za kraj se, u svrhu procjene kinetičke energije turbulencije pomoću mjerenja LIDAR-a, tražila se veza između varijance niza mjerenja LIDAR-a i varijance niza mjerenja anemometra.

Ključne riječi: bura, radijalna komponenta brzine vjetra, kinetička energija turbulencije

Comparison of remote measurements with LIDAR and *in situ* measurements with an ultrasonic anemometer at Dubrovnik airport

Abstract

Bora is one of the strongest and most frequent winds at the eastern coast of the Adriatic Sea. Considering the height of the troposphere it reaches, it can be generally categorized as shallow or deep bora. This study is based on measurements from LIDAR and ultrasonic anemometer located near the Dubrovnik Airport. Due to its location, the Dubrovnik Airport's runway is highly exposed to the bora flows, causing significant issues in the air traffic. The analysis of measurements was conducted during two bora episodes in 2018. Initially, using surface synoptic chats and vertical wind profiles, the type of bora for both episodes was determined. Next, a comparison was made between the mean measurements of the radial wind component from the two instruments. Since the measurements were divided into datasets lasting 1.5 or 3.6 minutes, the relationship between the mean values of the LIDAR dataset and the anemometer dataset was sought. Finally, in order to estimate the turbulence kinetic energy using LIDAR and measurements, a connection was sought between the variance of the LIDAR dataset and the variance of the anemometer dataset.

Keywords: bora, radial wind component, turbulence kinetic energy

Sadržaj

1. Uvod **1**
1.1. Bura 1
1.2. Turbulencija bure 2
1.3. Motivacija i cilj istraživanja 5

2. Podaci i metode **8**

3. Rezultati i diskusija **11**
3.1. Epizoda bure: 15:30 (10.2.2018.) – 07:00 (11.2.2018.) 11
3.1.1. Sinoptička situacija i vertikalni profil vjetra 11
3.1.2. Radijalna brzina vjetra 13
3.1.3. Varijanca niza mjerenja 15
3.1.4. Revizija dobivenih rezultata za srednju vrijednost i varijancu niza mjerenja 16
3.2. Epizoda bure: 15:00 (21.3.2018.) – 19:00 (22.3.2018.) 19
3.2.1. Sinoptička situacija i vertikalni profil vjetra 19
3.2.2. Radijalna brzina vjetra 20
3.2.3. Varijanca niza mjerenja 23
3.2.4. Revizija dobivenih rezultata za srednju vrijednost i varijancu niza mjerenja 24

4. Zaključak **27**

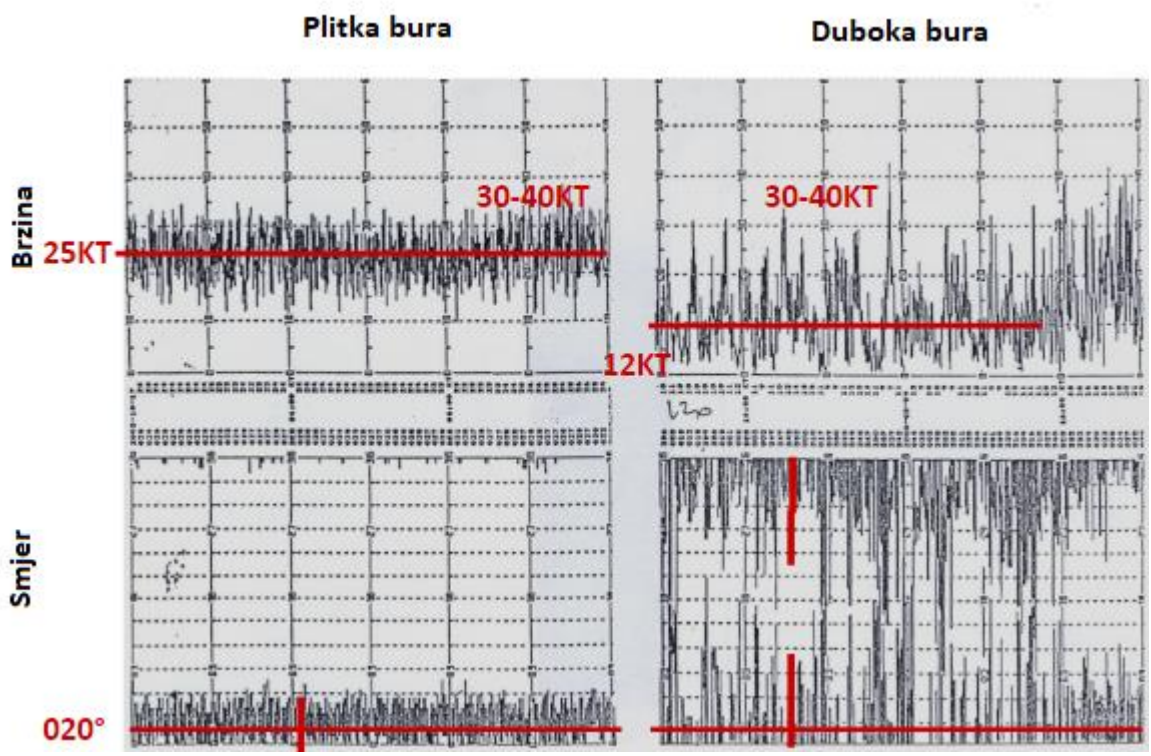
Literatura **29**

1. Uvod

1.1 Bura

Jedan od najčešćih i najsnažnijih tipova vjetra koji puše na području istočne obale Jadrana je bura. Ona je najčešće hladan i suh sjeveroistočni vjetar čiji udari mogu dosezati brzine koje su veće i od 55 m s^{-1} (npr. Belušić i Bencetić Klaić, 2006). S obzirom na smjer, bura na području istočnog Jadrana puše s kopna na more. Događaji bure mogu trajati do nekoliko dana pa i tjedana (npr. Golem i sur., 2022) te su u prosjeku češće u zimskom razdoblju (od 10. do 4. mjeseca). Razlikuju se tri sinoptička tipa bure: ciklonalna, anticiklonalna i frontalna bura (npr. Jurčec, 1988; Večenaj, 2005). Tip bure može se najčešće odrediti već pomoću prizemne sinoptičke karte. Ciklonalna ili ''tamna'' bura puše kad je u kontinentalnom dijelu prisutno polje visokog tlaka, a na području južnog Jadrana polje niskog tlaka. Za ovaj tip bure je na području istočne obale Jadrana karakteristično oblačno vrijeme uz veliku mogućnost obilne oborine (npr. Penzar i sur., 2001; Hercigonja 2022). Ovaj tip bure se još naziva i ''škura'' bura. Anticiklonalna ili ''jasna'' bura puše kad na području središnje Europe dominira anticiklona koja se proteže sve do istočne obale Jadrana, a na području Sredozemlja je prisutno polje niskog tlaka. Ovaj tip bure donosi vedro i suho vrijeme, te izuzetno dobru vidljivost. Frontalni tip bure se javlja zbog prizemnog prodora hladnog zraka neposredno iza hladne fronte te u pravilu nije dugog trajanja (npr. Jurčec, 1988). S obzirom na visinu troposfere do koje bura prodire, razlikujemo dva tipa bure: plitku i duboku buru. Plitka bura puše u nižoj troposferi te je sloj u kojem je prisutna jasno vidljiv. S druge strane, duboku buru karakterizira sjeverno strujanje duž cijele troposfere te se ne može jasno odrediti granica sloja u kojem je prisutna (prodire barem do 500 hPa i iznad). Najvažnije razlike između ova dva tipa bure su što plitka bura ima veću srednju brzinu vjetra i manje promjene srednje brzine i smjera vjetra od duboke bure. Također, valja napomenuti da su udari duboke bure usporedivi s udarima plitke bure. Navedene karakteristike plitke i duboke bure se mogu vidjeti na slici 1.1. Iz ovih razloga je duboku buru vrlo teško prognozirati pa zato stvara velike poteškoće

u zračnom prometu (npr. Večenaj i sur., 2020). Stoga su u svrhu što bolje prognoze počela sve detaljnija istraživanja duboke bure kako bi zračni promet bio što sigurniji.



Slika 1.1. Primjer brzine i smjera puhanja plitke (lijevo) i duboke (desno) bure; zračna luka Dzbrovnik (izvor: Večenaj i sur., 2020)

1.2. Turbulencija bure

Za određivanje turbulencije, općenito su potrebne procjene kinetičke energije turbulencije (TKE, uobičajena kratica dolazi iz engleskog jezika, 'turbulence kinetic energy'), njene disipacije (ε), te mehaničkih i toplinskih tokova. Za početak je važan pravilan odabir prostorne/vremenske skale turbulencije, što je kod bure izuzetno zahtjevno jer tu imaju utjecaj procesi na nekoliko skala. U analizi turbulencije razlikujemo (barem) dvije skale. Prva skala (λ u prostoru i τ u vremenu) predstavlja najveću skalnu duljinu koja izdvaja turbulenciju od većih skala. Druga (Reynoldsova) skala (L u prostoru i T u vremenu) je potrebna za određivanje varijanci komponenata brzine vjetra i kovarijance turbulentnog impulsa i toplinskog toka. Očekivani odnos između ove dvije skale je sljedeći: $(L,T) \geq (\lambda,\tau)$. Brojnim ranijim istraživanjima se došlo do zaključka da

mezoskalni procesi ne utječu značajnije na turbulenciju bure u atmosferskom graničnom sloju (npr. Večenaj, 2012). Stoga, ako promotrimo Fourierove spektre atmosferskih varijabli između sinoptičke skale i mikroskale, trebali bi smo vidjeti jasnu granicu. Ta granica predstavlja spektralni minimum energije (eng. 'Energy gap') na mezoskali. Radi elegantne primjene, za odabir skale se najčešće koristi Fourierova spektralna analiza (npr. Stull, 1988; Večenaj i sur., 2020).

Geofizički odsjek, Prirodoslovno-matematičkog fakulteta u Zagrebu je proveo istraživanje na području zračne luke Dubrovnik kojim je pokazano da se turbulencija bure nalazi na vremenskim skalama manjim od 30 min (npr. Večenaj, 2012). Analiza je napravljena na 12 epizoda bure koje su prikazane u tablici 1.1. Također, u tablici 1.1 se za svaku epizodu još može vidjeti ukupno vrijeme trajanja (u satima), maksimalna brzina udara vjetra i tip bure s obzirom na visinu troposfere do koje je bura dosegla (SM je plitka bura, a N je duboka bura).

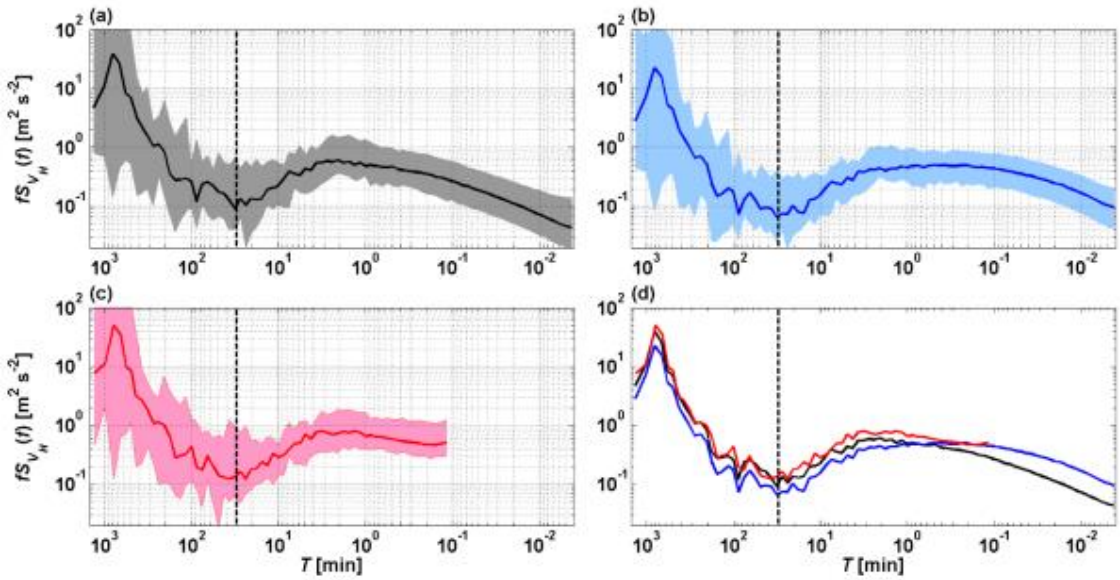
Tablica 1.1. Popis 12 epizoda bure (izvor: Večenaj i sur. 2020)

Početak [UTC]	**Kraj [UTC]**	**Trajanje [h]**	**$V_{max/udar}$ [m s^{-1}]**	**Tip bure**
17.12.2017. 08:00	19.12.2017. 10:00	50	17.2	SM
19.12.2017. 15:00	20.12.2017. 09:00	18	13.8	SM
20.12.2017. 16:00	22.12.2017. 19:00	51	21.1	SM → N
29.12.2017. 12:00	30.12.2017. 03:00	15	-	SM
02.01.2018. 16:00	03.01.2018. 05:00	13	20.6	SM
21.01.2018. 15:00	24.01.2018. 09:00	63	29.3	N
09.02.2018. 21:00	11.02.2018. 09:00	36	20.1	SM
14.02.2018. 18:00	15.02.2018. 11:00	17	19.4	SM
15.02.2018. 16:00	16.02.2018. 06:00	14	12.9	SM
23.02.2018. 17:00	24.02.2018. 10:00	17	16.1	SM
24.02.2018. 15:00	27.02.2018. 05:00	62	21.4	SM
21.03.2018. 12:00	22.03.2018. 21:00	33	25.5	SM

Mjerenja su vršena pomoću ultrazvučnih anemometara koji su se nalazili na meteorološkom tornju na 3 m i 10 m visine, te šaličnog anemometra koji se nalazio na pisti na tzv. pragu 12. Položaji meteorološkog tornja i praga 12 se mogu vidjeti na slici 1.2. Analiza je započeta izračunom spektara gustoće snage pomoću brze Fourierove transformacije za svih 12 epizoda bure, čiji je kompozit prikazan na slici 1.3. Grafovi (a) i (b) su dobiveni mjerenjima anemometara koji se nalaze na meteorološkom tornju, gdje je

prvi za mjerenja na 3 m, a drugi za mjerenja na 10 m visine iznad tla. Graf (c) (slika 1.3) je dobiven mjerenjima anemometra koji se nalazi na pisti na pragu 12. Na grafičkim prikazima (a), (b) i (c) osjenčani dio predstavlja raspon od 25. do 75. percentila, dok je puna linija medijan. Na grafu (d) su zajedno prikazani medijani sa grafova (a), (b) i (c). Na slici 1.3 je spektralni minimum energije vidljiv na svim spektrima na vremenskoj skali od 30 min (isprekidana vertikalna linija). S obzirom da su ranija istraživanja, koja su vršena na drugim lokacijama istočne obale Jadrana, također upućivala da je vremenska skala turbulencije bure oko 30 min, može se doći do zaključka da bi to mogla biti opća karakteristika za turbulenciju bure (npr. Večenaj, 2012; Šoljan i sur. 2018; Večenaj i sur., 2020).

Slika 1.2. Položaji meteorološkog tornja i praga 12 na pisti; zračna luka Dubrovnik (izvor: Večenaj i sur., 2020)



Slika 1.3. Kompozicija spektara, *fS(f)*, horizontalne komponente brzine vjetra 12 epizoda bure koje su navedene u tablici 1.1; zračna luka Dubrovnik (izvor: Večenaj i sur., 2020)

Kako bi se odredio TKE, podaci su podijeljeni u blokove koji traju 30 minuta. Za svaki blok valja na pravilan način postaviti koordinatni sustav, pa se u tu svrhu vrši rotacija koordinatnog sustava. Osi trebaju biti postavljene tako da je x os u smjeru vjetra (*u* komponenta brzine vjetra), y os okomito na smjer vjetra (*v* komponenta), a z os vertikalno prema gore (*w* komponenta). Za određivanje TKE-a su potrebne perturbacije (u', v', w'), pa stoga se od komponenata brzine vjetra (dobivenih rotacijom koordinatnog sustava) uklanjaju srednje vrijednosti i trendovi (ako su prisutni). Konačno, TKE za svaki pojedini niz podataka možemo izračunati pomoću relacije:

$$\mathrm{TKE} = \frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \tag{1}$$

O turbulenciji bure se može više saznati iz npr. Stull (2018), Večenaj i sur. (2012; 2020).

1.3. Motivacija i cilj istraživanja

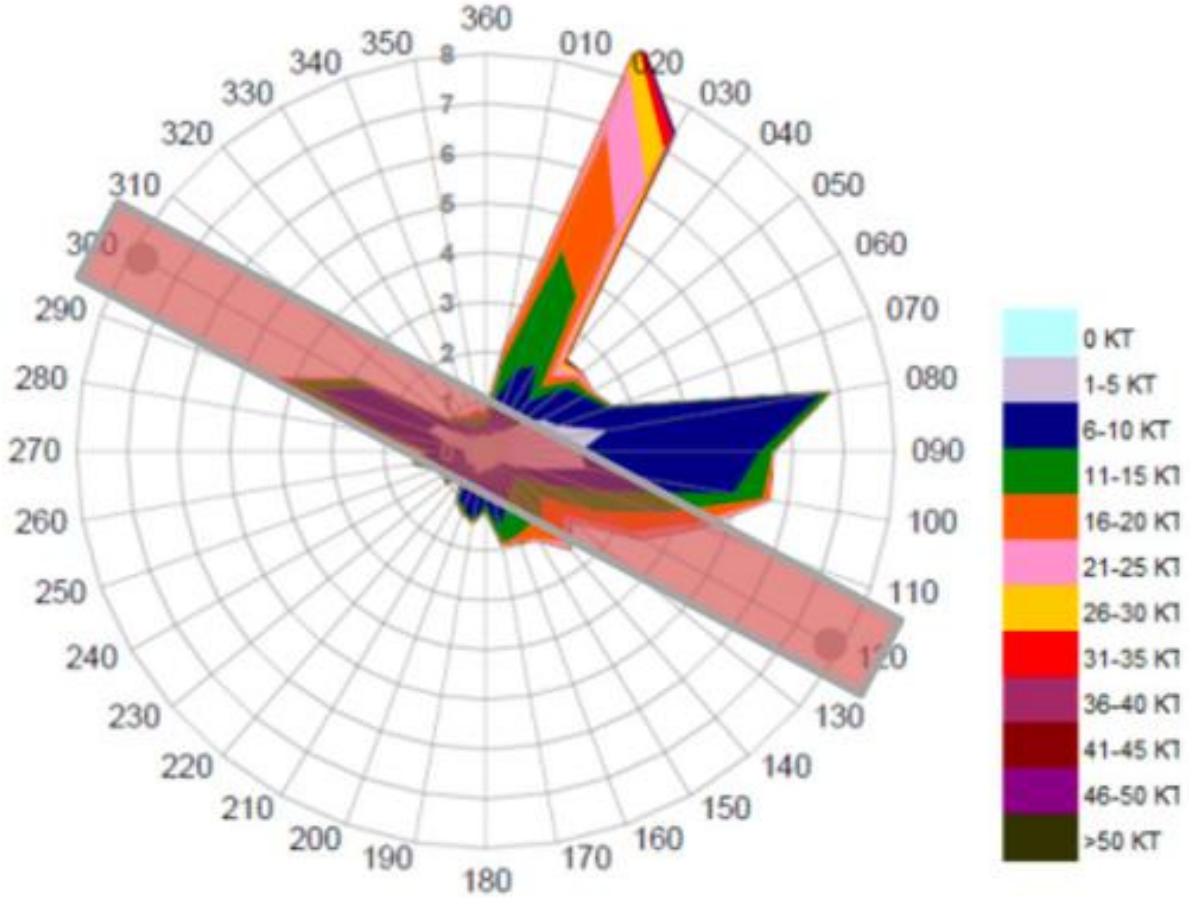
Zračna luka Ruđera Boškovića, Dubrovnik (u nastavku Zračna luka Dubrovnik) se nalazi na krajnjem jugu Hrvatske, u mjestu Čilipi koje je 20-ak km udaljeno od grada Dubrovnika. Smještena je između planine Sniježnica i otvorenog mora, te se proteže u

smjeru sjeverozapad – jugoistok. Zbog svog položaja, zračna luka je izuzetno osjetljiva na buru. Položaj zračne luke i smjer puhanja bure se mogu vidjeti na slici 1.4.

Iz ruže vjetrova koja prikazuje postotke učestalosti klasa brzine vjetra po smjerovima u odnosu na položaj piste zračne luke (slika 1.5), može se primijetiti da je bura najučestaliji i najsnažniji vjetar na tom području. To vodi do zaključka da je bura vjetar koji stvara najveće poteškoće na Dubrovačkom aerodromu (to se poglavito odnosi na slijetanje aviona) te od toga dolazi i motivacija za ovaj rad.

Cilj ovog rada jest usporedba mjerenja ultrazvučnog anemometra i LIDAR-a (eng. 'Light Detection and Ranging'), gdje se mjerenja LIDAR-a uspoređuju s mjerenjima anemometra koja se nominalno smatraju mjerodavnijim za in situ motrenja i mjerenja. Svrha te usporedbe jest procjena kinetičke energije turbulencije, koja se mogu dobiti mjerenjima anemometrom, te pomoću mjerenja LIDAR-om.

Slika 1.4. Položaj Dubrovačkog aerodroma i smjer puhanja bure (izvor: HKZP)



Slika 1.5. Ruža vjetrova i smjer pružanja piste na području zračne luke Dubrovnik (izvor: HKZP)

2. Podaci i metode

U sklopu projekta *Study of turbulence – Sesar 2020* (Večenaj i sur., 2020) u okolici Dubrovačkog aerodroma su bili postavljeni šalični anemometar (prag 12 na pisti), 10 m visoki meteorološki stup na kojem su se nalazila dva ultrazvučna anemometra (na 3 m i 10 m visine iznad tla), te LIDAR. Šalični anemometar i LIDAR su instrumenti Hrvatske kontrole zračne plovidbe, dok meteorološki stup, sa dva ultrazvučna anemometra, pripada Geofizičkom odsjeku Prirodoslovno-matematičkog fakulteta u Zagrebu. U ovom radu će se vršiti analiza mjerenja ultrazvučnog anemometra koji se nalazio na meteorološkom stupu na 10 m visine i LIDAR-a. Koordinate ultrazvučnog anemometra su 18.254° E i 42.564° N, a LIDAR-a 18.251° E i 42.582° N. Zračna udaljenost između anemometra i LIDAR-a je bila 1.91 km, te se LIDAR nalazio na većoj nadmorskoj visini (razlika je 86 m). Zbog navedene razlike u nadmorskoj visini, LIDAR se nagnuo prema dolje za 1.7°. Meteorološki stup i LIDAR su prikazani na slici 2.1, dok su njihove lokacije mogu vidjeti na slici 2.2.

Slika 2.1. Meteorološki stup (lijevo) i LIDAR (desno) koji su bili postavljeni u blizini zračne luke Dubrovnik u razdoblju od 8.12.2017. do 31.3.2018. (izvor: Večenaj i sur. 2020)

Slika 2.2. Lokacije LIDAR-a i ultrazvučnog anemometra koji su bili postavljeni u blizini zračne luke Dubrovnik u razdoblju od 8.12.2017. do 31.3.2018. (izvor: Večenaj i sur. 2020)

Usporedba mjerenja napravljena je za dvije epizode bure. Prva je trajala od 15:30 10.2.2018. do 07:00 11.2.2018., a druga od 15:00 21.3.2018. do 19:00 22.3.2018. Anemometar vrši mjerenja svakih 0.1 sekundi (frekvencija uzorkovanja je 10 Hz). LIDAR može vršiti mjerenja u više smjerova i na više udaljenosti. Kako bi se mjerenja LIDAR-a i anemometra mogla usporediti, uzeta su samo ona mjerenja koja je LIDAR izvršio kada je mjerio u smjeru anemometra na udaljenosti od 1931 m (ova udaljenost je bila najbliža udaljenosti na kojoj se nalaze instrumenti). Za epizodu bure 10.2.2018./11.2.2018. mjerenja u željenom smjeru traju uvijek 1.5 min (nakon toga LIDAR promjeni mod u kojem mjeri). Za epizodu bure 21.3.2018./22.3.2018. ta mjerenja traju 1.5 min do 7 h (22.3.2018.), a zatim 3.6 min sve do kraja te epizode. LIDAR u svakom modu izvršava mjerenja svakih 1.2 s.

S obzirom da LIDAR direktno mjeri radijalnu brzinu vjetra, a anemometar sve tri komponente brzine vjetra, iz mjerenja anemometra je izračunata radijalna brzina vjetra kako bi usporedba bila moguća. Za taj račun je za početak potrebna rotacija standardnog koordinatnog sustava oko z osi za kut φ = 270.001345°. Do navedenog kuta φ se dolazi

koristeći poznate koordinata instrumenata. Nakon rotacije se komponente brzine vjetra u novom (rotiranom) koordinatnom sustavu mogu izračunati pomoću standardnih relacija:

$$u_1 = u\cos(\varphi) + v\sin(\varphi) \tag{2}$$

$$v_1 = -u\sin(\varphi) + \mathrm{v}\cos(\varphi) \tag{3}$$

$$w_1 = w \tag{4}$$

gdje su u, v i w komponente brzine vjetra u starom sustavu (prije rotacije), a u_1, v_1 i w_1 komponente brzine vjetra novom sustavu (nakon rotacije). Zatim, novi koordinatni sustav valja zarotirati oko osi y_1 za kut α = 358.3° jer je LIDAR nagnut prema dolje za 1.7° zbog razlike u visini između instrumenta. Nakon što se izvrši i druga rotacija, komponente brzine vjetra novog sustava se mogu izračunati pomoću sljedećih relacija:

$$u_2 = u_1\cos(\alpha) + w_1\sin(\alpha) \tag{5}$$

$$v_2 = v_1 \tag{6}$$

$$w_2 = -u_1\sin(\alpha) + w_1\cos(\alpha) \tag{7}$$

gdje su u_2, v_2 i w_2 komponente brzine vjetra u sustavu koji je dobiven nakon druge rotacije. U koordinatnom sustavu (x_2, y_2, z_2) će radijalnu brzinu vjetra (onu koju mjeri LIDAR) predstavljati komponenta brzine u smjeru osi x_2, to jest u_2. S obzirom da anemometar napravi 12 mjerenja, dok LIDAR napravi jedno mjerenje, radi točnosti su se uspoređivale srednje vrijednosti svakih 12 mjerenja anemometra sa pripadnim mjerenjima LIDAR-a.

Usporedba mjerenja je započeta prikazom vremenskih nizova radijalne brzine vjetra. Zatim se tražila ovisnost radijalne brzine vjetra, koju je izmjerio LIDAR, o radijalnoj brzini vjetra, koju je izmjerio anemometar. Kako su epizode bure sastavljene od nizova mjerenja koja traju 1.5 ili 3.6 min, za svaki niz je izračunata srednja vrijednost i varijanca (za oba instrumenta). Na posljetku se tražila ovisnost srednje vrijednosti niza mjerenja LIDAR-a o srednjoj vrijednosti niza mjerenja anemometra te ovisnost varijance niza mjerenja LIDAR-a o varijanci niza mjerenja anemometra. Grafički prikazi su dobiveni pomoću programskog jezika Python3.

3. Rezultati i diskusija

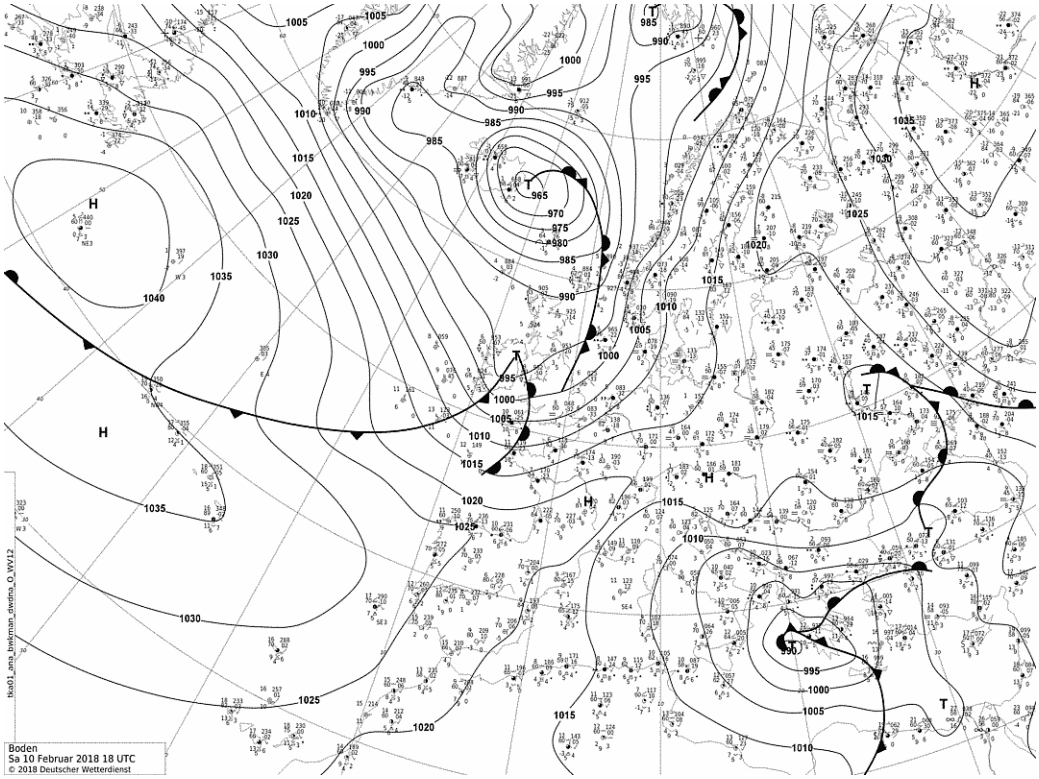
U ovom dijelu će za početak biti prikazani rezultati za epizodu bure koja je trajala od 15:30 10.2.2018. do 07:00 11.2.2018., te nakon toga za epizodu bure koja je trajala od 15:00 21.3.2018. do 19:00 22.3.2018.. Iz tablice 1.1 vidljivo je da su ove dvije epizode zapravo trajale dulje, ali je u samu analizu uzet onaj period u kojem je bura bila najjača.

3.1. Epizoda bure: 15:30 (10.2.2018.) – 07:00 (11.2.2018.)

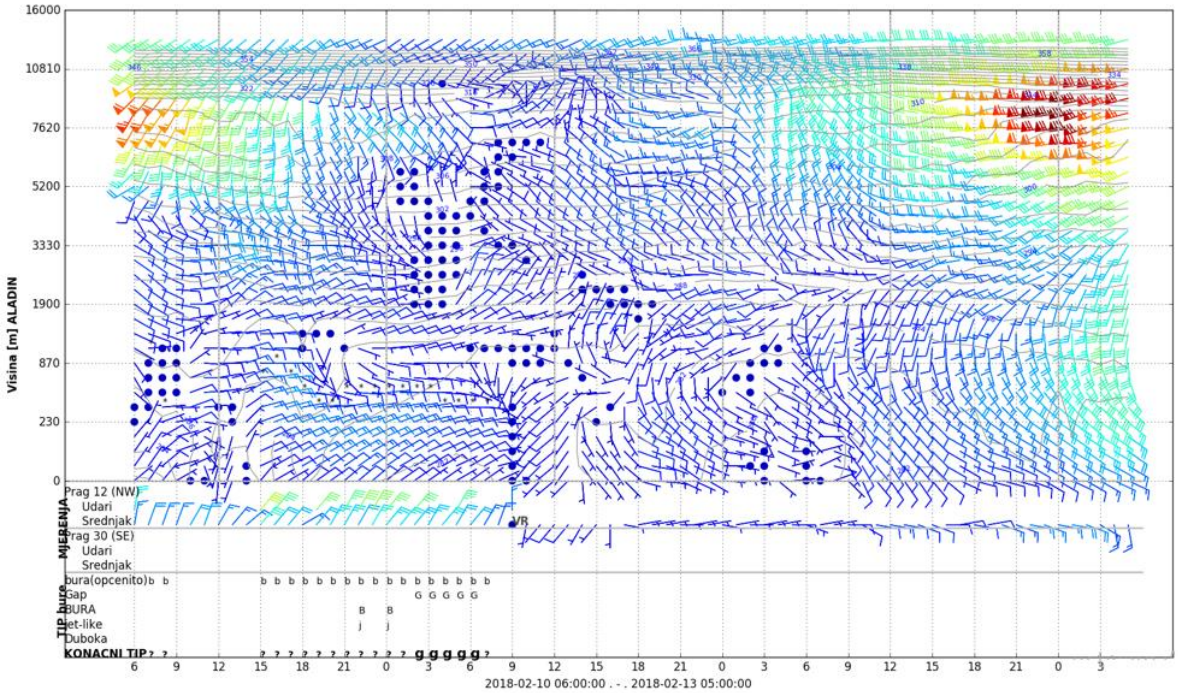
3.1.1. Sinoptička situacija i vertikalni profil vjetra

Kako bi se odredio sinoptički tip bure u ovoj epizodi, valja promotriti prizemnu sinoptičku kartu. Za primjer je uzeta karta u terminu 10. veljače 2018. u 18 UTC (slika 3.1). Na karti se jasno može primijetiti ciklona na području južnog Jadrana, dok je u kontinentalnom dijelu prisutan povišeni tlak, pa se iz toga može doći do zaključka da se ovdje radilo dominantno o ciklonalnom tipu bure. Kao što je poznato od ranije, ovaj tip bure na područje istočne obale Jadrana donosi oblačno vrijeme uz veliku mogućnost za oborinu.

Na slici 3.2 se nalazi vertikalni profil vjetra pomoću kojega se može odrediti tip bure s obzirom na visinu troposfere do koje ona prodire. Iz priloženog profila se može vidjeti da bura ne prodire iznad 500 hPa, te je sloj u kojem puše jasno vidljiv. Iz toga se može zaključiti da se ovdje radilo o plitkoj buri. Valja napomenuti da vertikalni profil sa slike 3.2 obuhvaća razdoblje od 06:00 UTC 10.2.2018. do 05:00 UTC 13.2.2018. što je dulje od promatrane epizode bure.



Slika 3.1. Prizemna sinoptička karta: 10.2.2018. 18 UTC (izvor: wetter3.de)



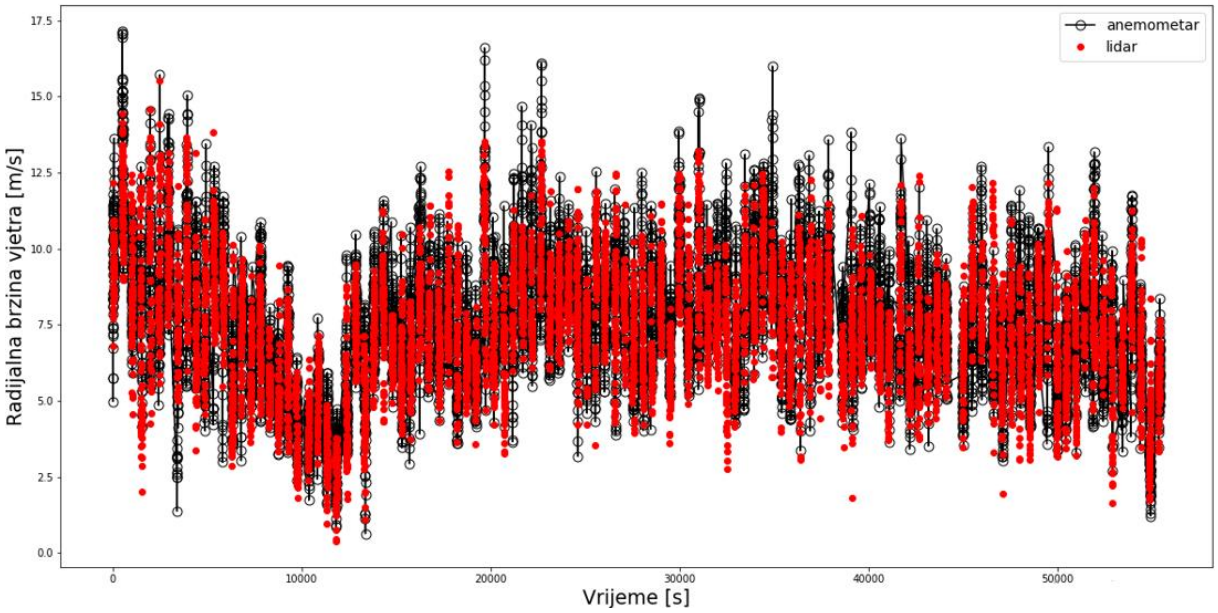
Slika 3.2. Vertikalni profil vjetra: 06:00 UTC 10.2.2018. - 05:00 UTC 13.2.2018. (izvor: HKZP, prikazan je produkt modela Aladin DHMZ-a)

3.1.2. Radijalna brzina vjetra

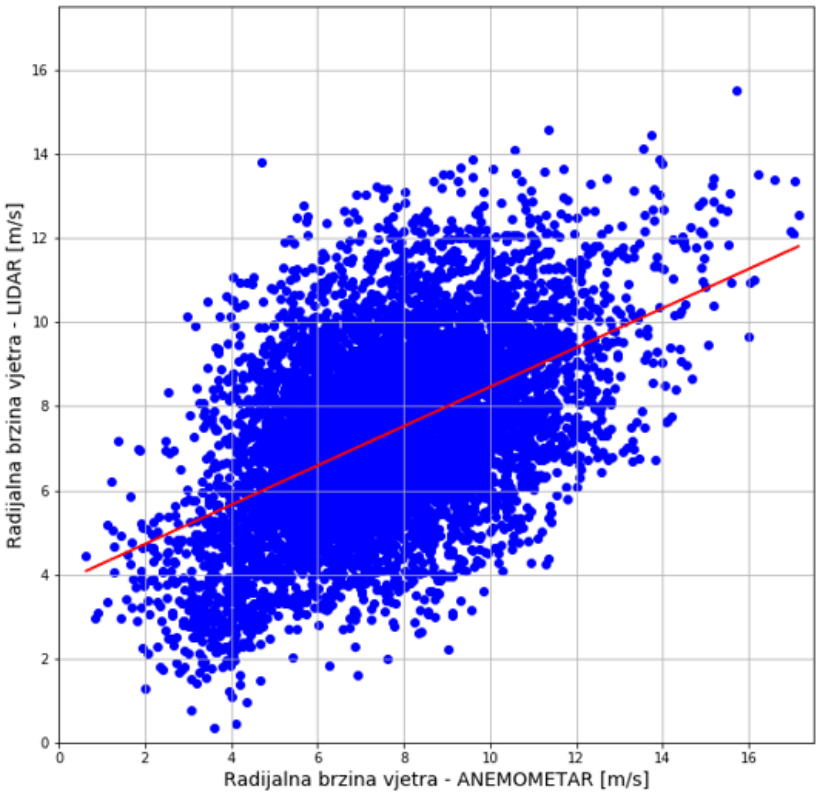
U svrhu usporedbe mjerenja LIDAR-a i ultrazvučnog anemometra, za početak su prikazani vremenski nizovi radijalne brzine vjetra. Od ranije je poznato da LIDAR izravno mjeri radijalnu brzinu vjetra, dok anemometar mjeri sve tri komponente brzine vjetra iz kojih možemo izračunati radijalnu brzinu kako je opisano u poglavlju 2. Na slici 3.3 su spomenuti vremenski nizovi nacrtani jedan preko drugog radi bolje usporedbe. Mjerenja LIDAR-a su prikazana crvenim ispunjenim kružićima, dok su mjerenja anemometra prikazana crnim neispunjenim kružićima. Na slici se vidi da se nizovi u velikoj mjeri podudaraju, ali valja obratiti pažnju i na odstupanja koja su također prisutna.

Zatim je prikazana ovisnost radijalne brzine vjetra LIDAR-a o radijalnoj brzini vjetra anemometra (slika 3.4). Na grafu se može vidjeti da su se ucrtane točke formirale u oblik koji je nalik nakošenoj elipsi. S obzirom da je dobivena ovisnost najbliža linearnoj, ucrtan je pravac, te je izračunata jednadžba pravca $u_{2,LID} = au_{2,USA} + b$. Za jednadžbu pravca su dobivene sljedeće vrijednosti: a = 0.468, b = 3.786 ms^{-1}, gdje je a nagib pravca, a b odsječak na ordinati (a i b označavaju iste stvari i u kasnijim razmatranjima).

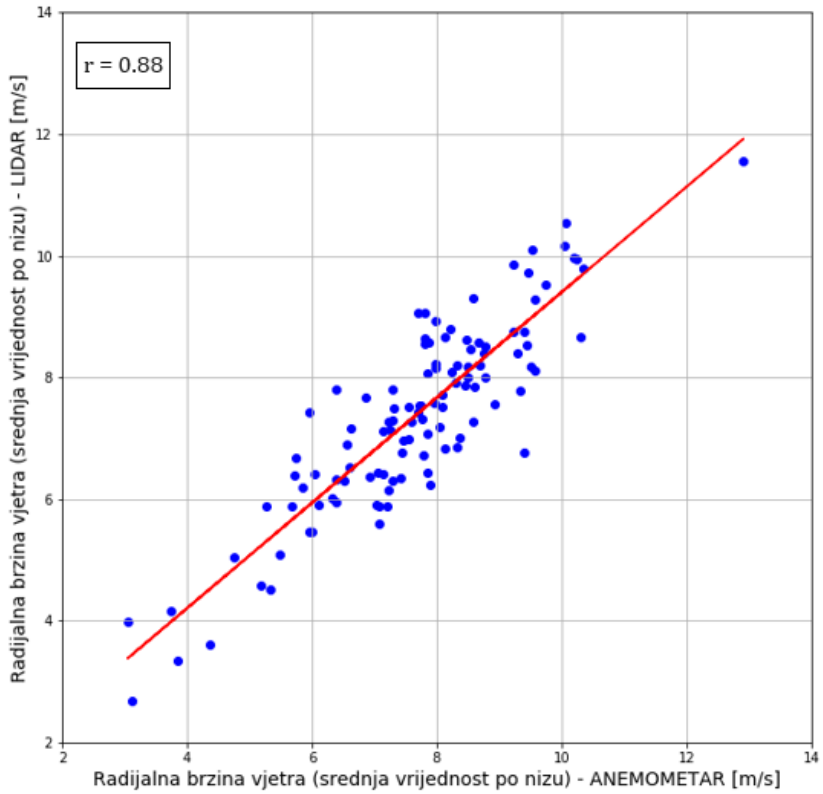
U idućem koraku je za svaki niz mjerenja izračunata srednja vrijednost, te je prikazana ovisnost srednje vrijednosti niza mjerenja LIDAR-a o srednjoj vrijednost niza mjerenja anemometra (slika 3.5). Na grafu se jasno može vidjeti da je dobivena linearna ovisnost (znatno uočljivija nego na slici 3.4), pa je stoga ucrtan pravac. Jednadžba pravca se može dobiti pomoću sljedećih izračunatih vrijednosti: a = 0.866, b = 0.742 ms^{-1}. Izračunati koeficijent korelacije iznosi: r = 0.88.



Slika 3.3. Vremenski nizovi radijalne brzine vjetra LIDAR-a i anemometra za epizodu bure koja je trajala od 15:30 (10.2.2018.) do 07:00 (11.2.2018.) na području zračne luke Dubrovnik



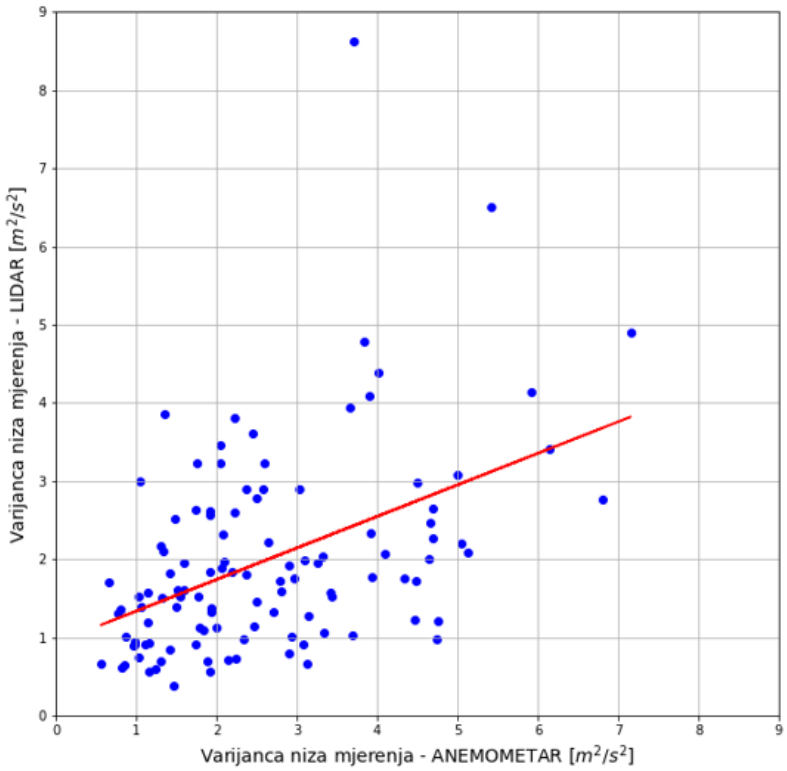
Slika 3.4. Ovisnost radijalne brzine vjetra LIDAR-a o radijalnoj brzini vjetra anemometra za epizodu bure koja je trajala od 15:30 (10.2.2018.) do 07:00 (11.2.2018.) na području zračne luke Dubrovnik



Slika 3.5. Ovisnost srednje vrijednosti niza mjerenja LIDAR-a o srednjoj vrijednosti niza mjerenja anemometra za epizodu bure koja je trajala od 15:30 (10.2.2018.) do 07:00 (11.2.2018.) na području zračne luke Dubrovnik.

3.1.3. Varijanca niza mjerenja

Iz relacije 1 iz potpoglavlja 1.2, može se vidjeti da su u izračunu TKE-a za svaki niz mjerenja potrebni $\overline{u'^2}$, $\overline{v'^2}$ i $\overline{w'^2}$. Te veličine su zapravo varijance nizova mjerenja komponenti brzine vjetra. Od ranije je poznato da se iz mjerenja anemometra mogu izračunati sve tri komponente (kako je objašnjeno u poglavlju 2), dok LIDAR izravno mjeri samo radijalnu komponentu brzine vjetra (u_2). Stoga je za svaki niz mjerenja radijalne brzine vjetra izračunata varijanca, te je prikazana ovisnost varijance niza mjerenja LIDAR-a o varijanci niza mjerenja anemometra (slika 3.6). Iz grafičkog prikaza se može vidjeti da se ovdje radi o linearnoj ovisnosti, ali valja obratiti pažnju i na poveća odstupanja pojedinih točaka od pravca. Za jednadžbu pravca, $var_{LID} = a var_{USA} + b$, izračunate su sljedeće vrijednosti: a = 0.404, b = 0.931 m^2s^{-2}.



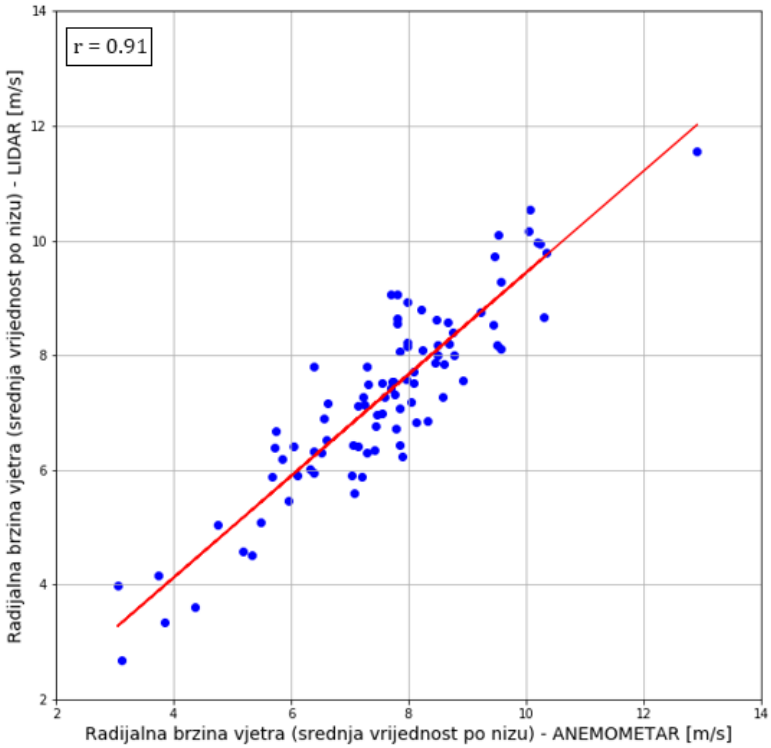
Slika 3.6. Ovisnost varijance niza mjerenja LIDAR-a o varijanci niza mjerenja anemometra za epizodu bure koja je trajala od 15:30 (10.2.2018.) do 07:00 (11.2.2018.) na području zračne luke Dubrovnik

3.1.4. Revizija dobivenih rezultata za srednju vrijednost i varijancu niza mjerenja

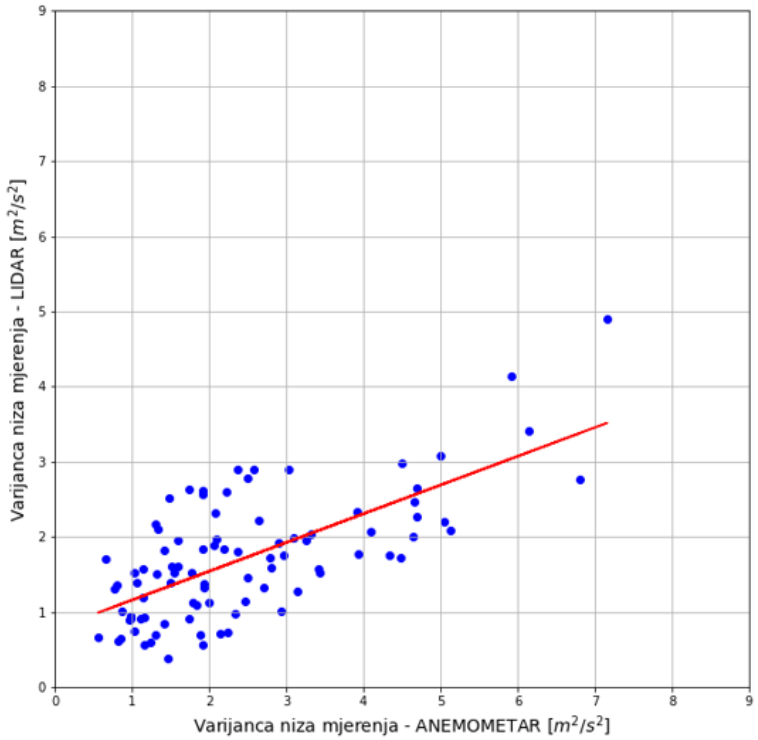
S obzirom da je u ranijem razmatranju varijance niza mjerenja dobivena linearna ovisnost (slika 3.6) gdje je nekolicina točaka poprilično odstupala od pravca, u ovom dijelu će se za početak ukloniti 20% podataka (točaka) koji najviše odstupaju od dobivenog pravca na slici 3.6. Zatim će se ponovno, s preostalih 80% podataka, prikazati ovisnosti srednje vrijednosti (slika 3.7) i varijance (slika 3.8) niza mjerenja LIDAR-a o nizu mjerenja anemometra, čime se povećava robusnost rezultata. Valja napomenuti da su grafički prikazi na slikama 3.7 i 3.8 napravljeni pomoću istih nizova mjerenja. Na slikama 3.7 i 3.8 se može vidjeti linearna ovisnost gdje sada točke znatno manje odstupaju od pravca u odnosu na ranija razmatranja. To se poglavito odnosi na ovisnost varijance niza mjerenja LIDAR-a o varijanci niza mjerenja anemometra s obzirom da su ranije (slika 3.6) bila

prisutna veća odstupanja nekolicine točaka od pravca. Za oba pravca su izračunati a i b, te iznose: a = 0.887, b = 0.574 ms^{-1} (slika 3.7); a = 0.383, b = 0.774 m^2s^{-2} (slika 3.8). Nakon revizije, koeficijent korelacije između srednje vrijednosti niza mjerenja LIDAR-a i niza mjerenja anemometra iznosi: r = 0.91.

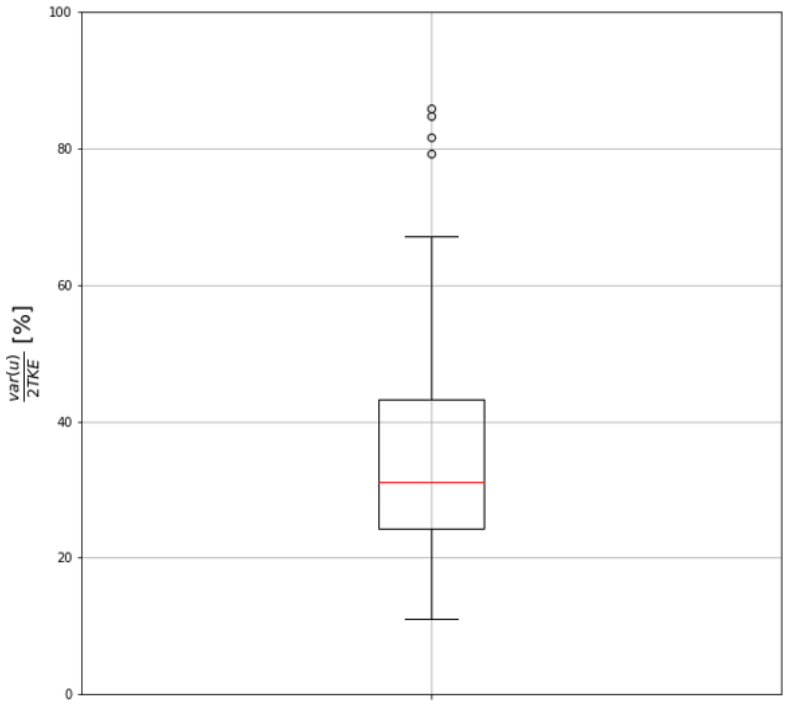
Nadalje je za navedenih 80% nizova izračunat TKE pomoću mjerenja anemometra (relacija 1), kako bi se izračunao omjer $\frac{\overline{u'^2}}{2TKE}$. U brojniku se nalazi varijanca niza mjerenja LIDAR-a. Iz (1) se može vidjeti da ovaj omjer daje informaciju koliki je postotak prvog člana u ukupnom TKE-u. Na slici 3.9 se nalazi kutijasti dijagram (eng. 'box plot') koji prikazuje odnose medijana (crvena linija), ekstrema (kružići), maksimuma i minimuma (horizontalne crne linije), te gornjeg i donjeg kvartila (pravokutnik) za navedeni omjer.



Slika 3.7. Ovisnost srednje vrijednosti niza mjerenja LIDAR-a o srednjoj vrijednosti niza mjerenja anemometra (80% podataka) za epizodu bure koja je trajala od 15:30 (10.2.2018.) do 07:00 (11.2.2018.) na području zračne luke Dubrovnik



Slika 3.8. Ovisnost varijance niza mjerenja LIDAR-a o varijanci niza mjerenja anemometra (80% podataka) za epizodu bure koja je trajala od 15:30 (10.2.2018.) do 07:00 (11.2.2018.) na području zračne luke Dubrovnik



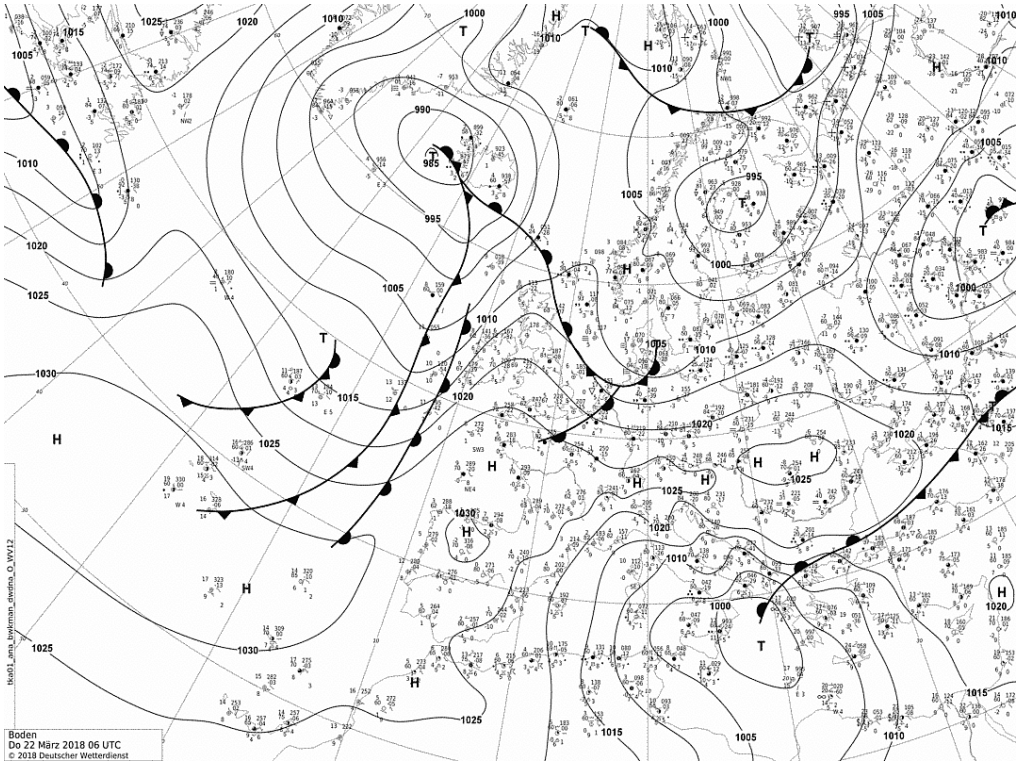
Slika 3.9. Kutijasti dijagram za omjer $\frac{\overline{u'^2}}{2TKE}$ (80% podataka) za epizodu bure koja je trajala od 15:30 (10.2.2018.) do 07:00 (11.2.2018.) na području zračne luke Dubrovnik

3.2. Epizoda bure: 15:00 (21.3.2018.) – 19:00 (22.3.2018.)

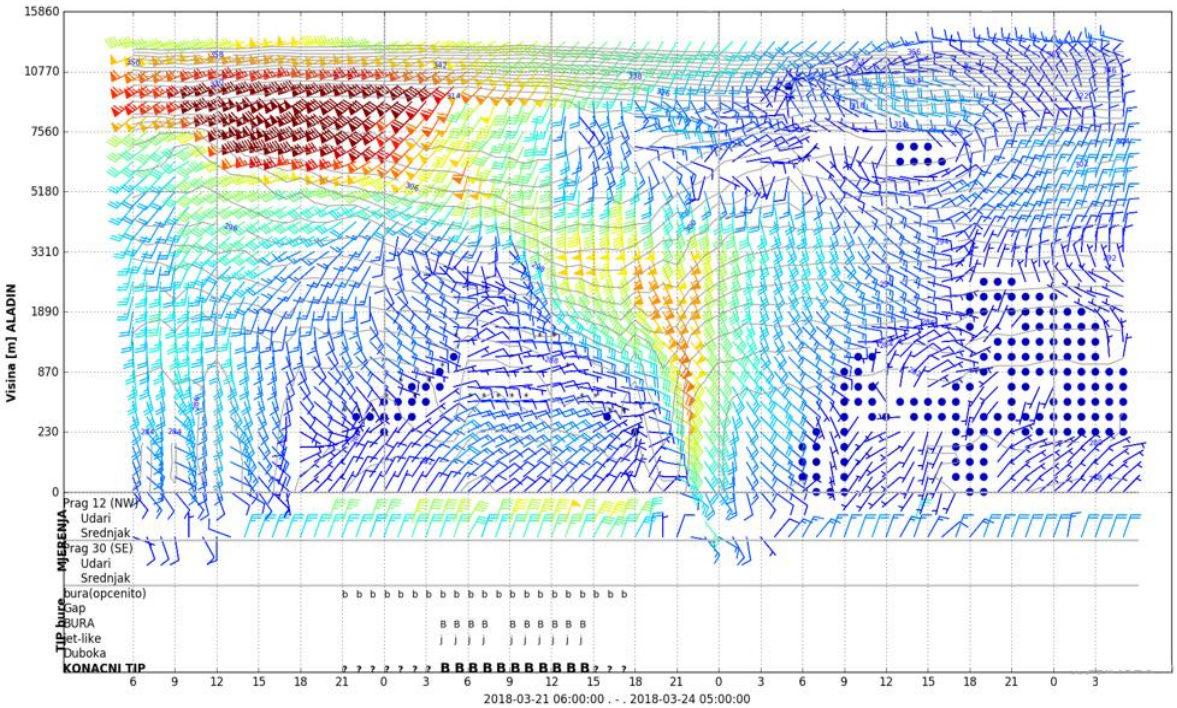
3.2.1. Sinoptička situacija i vertikalni profil vjetra

Kao i ranije, sinoptički tip bure će se odrediti pomoću prizemne sinoptičke karte koja je prikazana na slici 3.10. Karta prikazuje prizemnu sinoptičku situaciju u terminu 22. ožujka 2018. u 06 UTC. Na karti se jasno može vidjeti ciklona na području južnog Jadrana, dok je u kontinentalnom dijelu prisutno središte povišenog tlaka zraka. To ukazuje da se i u ovoj epizodi radilo o ciklonalnom tipu bure koji na području istočne obale Jadrana donosi oblačno vrijeme uz mogućnost za oborinu.

Vertikalni profil vjetra je prikazan na slici 3.11. Iz njega se vidi da bura ne prodire u više slojeve troposfere (iznad 500 hPa), pa se može zaključiti da je i ova bura plitka. Ovdje također valja napomenuti da prikazani profil obuhvaća dulje vremensko razdoblje od trajanja same epizode bure (vertikalni profil: 06:00 UTC 21.3.2018. – 05:00 UTC 24.3.2018.).



Slika 3.10. Prizemna sinoptička karta: 22.3.2018. 06 UTC (izvor: wetter3.de)



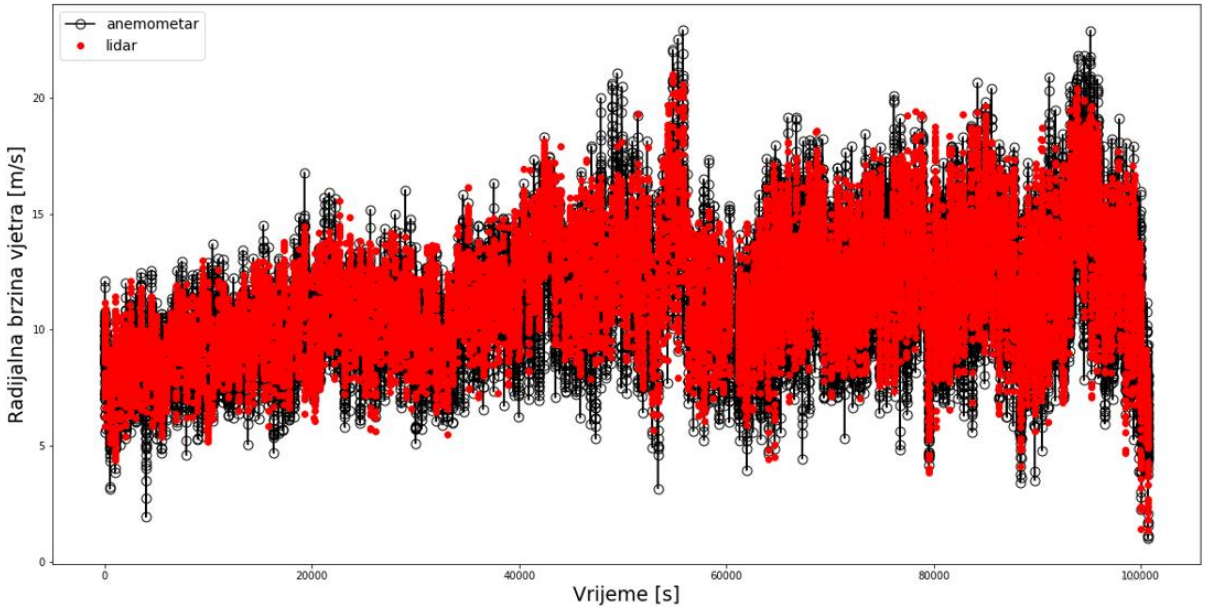
Slika 3.11. Vertikalni profil vjetra: 06:00 UTC 21.3.2018. - 05:00 UTC 24.3.2018. (izvor: HKZP, prikazan je produkt modela Aladin DHMZ-a)

3.2.2. Radijalna brzina vjetra

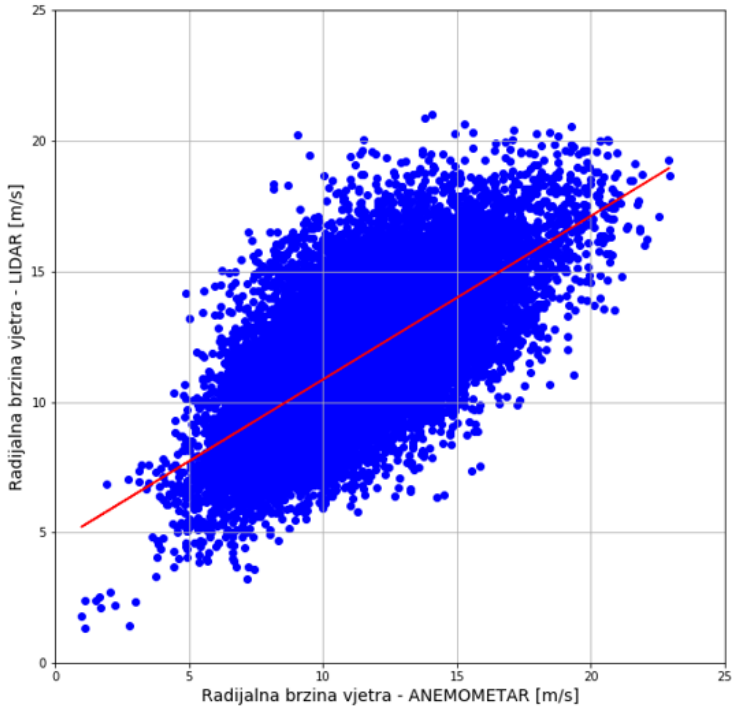
Kao i kod prve epizode bure, usporedba mjerenja LIDAR-a i ultrazvučnog anemometra će se započeti usporedbom vremenskih nizova radijalne brzine vjetra (slika 3.12). Na slici 3.12 se mogu vidjeti dva navedena vremenska niza nacrtana jedan preko drugog gdje su ponovno mjerenja LIDAR-a prikazana crvenim ispunjenim kružićima, dok su mjerenja anemometra prikazana crnim neispunjenim kružićima. Sa slike je vidljivo da se nizovi dobro preklapaju (uz određena odstupanja).

Na slici 3.13 prikazan je graf ovisnosti radijalne brzine vjetra LIDAR-a o radijalnoj brzini vjetra anemometra. Kao što je to bio slučaj i u prvoj epizodi, točke su ponovno formirale oblik koji je nalik nakošenoj elipsi. Dobivena ovisnost najviše odgovara linearnoj, iako treba obratiti pažnju na odstupanja točaka od pravca (za neke točke su ta odstupanja poprilično velika). Izračunate su vrijednosti a i b za jednadžbu pravca, te one iznose: a = 0.627, b = 4.589 ms^{-1}.

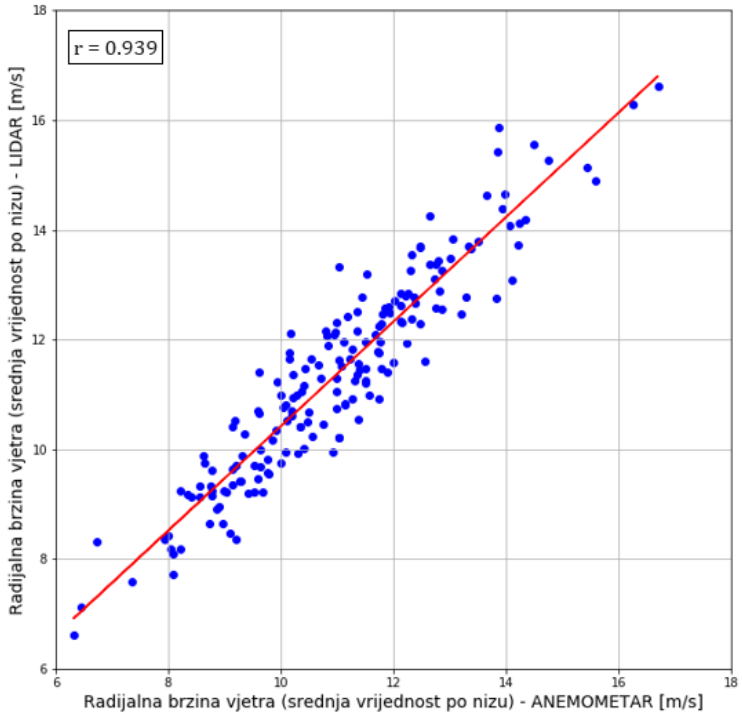
Zatim je za svaki niz mjerenja izračunata srednja vrijednost, te je prikazana ovisnost srednje vrijednosti niza mjerenja LIDAR-a o srednjoj vrijednosti niza mjerenja anemometra (slika 3.14). Valja napomenuti da u ovoj epizodi nizovi traju 1.5 min do 7 h (22.3.2018.), a zatim do kraja epizode traju 3.6 min. Na grafu se jasno može vidjeti da se ovdje radi o linearnoj ovisnosti, te su izračunate sljedeće vrijednosti za jednadžbu pravca: a = 0.952, b = 0.901 ms^{-1}. Izračunati koeficijent korelacije iznosi: r = 0.939.



Slika 3.12. Vremenski nizovi radijalne brzine vjetra LIDAR-a i anemometra za epizodu bure koja je trajala od 15:00 (21.3.2018.) do 19:00 (22.3.2018.) na području zračne luke Dubrovnik



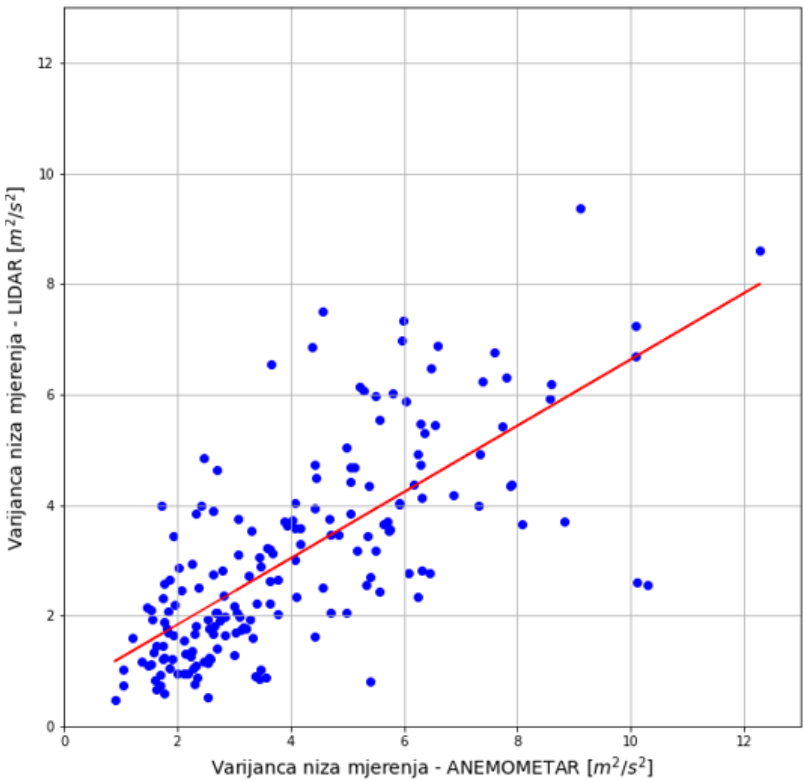
Slika 3.13. Ovisnost radijalne brzine vjetra LIDAR-a o radijalnoj brzini vjetra anemometra za epizodu bure koja je trajala od 15:00 (21.3.2018.) do 19:00 (22.3.2018.) na području zračne luke Dubrovnik



Slika 3.14. Ovisnost srednje vrijednosti niza mjerenja LIDAR-a o srednjoj vrijednosti niza mjerenja anemometra za epizodu bure koja je trajala od 15:00 (21.3.2018.) do 19:00 (22.3.2018.) na području zračne luke Dubrovnik

3.2.3. Varijanca niza mjerenja

Kao što je objašnjeno u potpoglavlju 3.1.3, u izračunu TKE-a za svaki niz mjerenja su potrebne varijance nizova mjerenja komponenti brzine vjetra ($\overline{u'^2}$, $\overline{v'^2}$ i $\overline{w'^2}$). S obzirom da LIDAR mjeri samo radijalnu komponentu brzine vjetra (u_2), i ovdje će se izračunati varijance nizova mjerenja radijalne brzine vjetra za oba instrumenta, te zatim prikazati ovisnost varijance niza mjerenja radijalne brzine vjetra LIDAR-a o varijanci niza mjerenja radijalne brzine vjetra anemometra (slika 3.15). Iz dobivenog grafičkog prikaza se može primijetiti linearna ovisnost. Valja napomenuti da su ovdje prisutna znatno veća odstupanja točaka od pravca nego što je to bio slučaj na grafu sa slike 3.14. Za jednadžbu pravca su izračunate sljedeće vrijednosti: a = 0.600, b = 0.637 m^2s^{-2}.

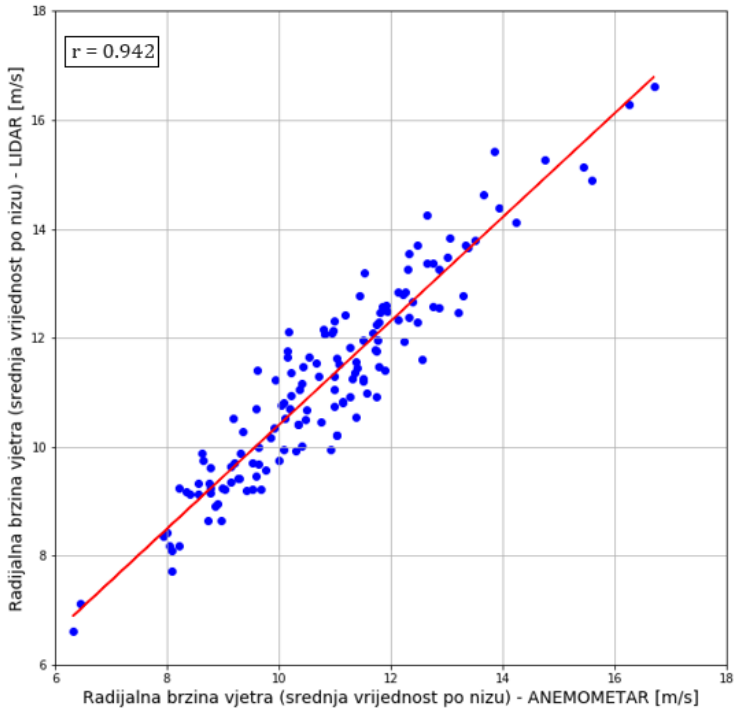


Slika 3.15. Ovisnost varijance niza mjerenja LIDAR-a o varijanci niza mjerenja anemometra za epizodu bure koja je trajala od 15:00 (21.3.2018.) do 19:00 (22.3.2018.) na području zračne luke Dubrovnik

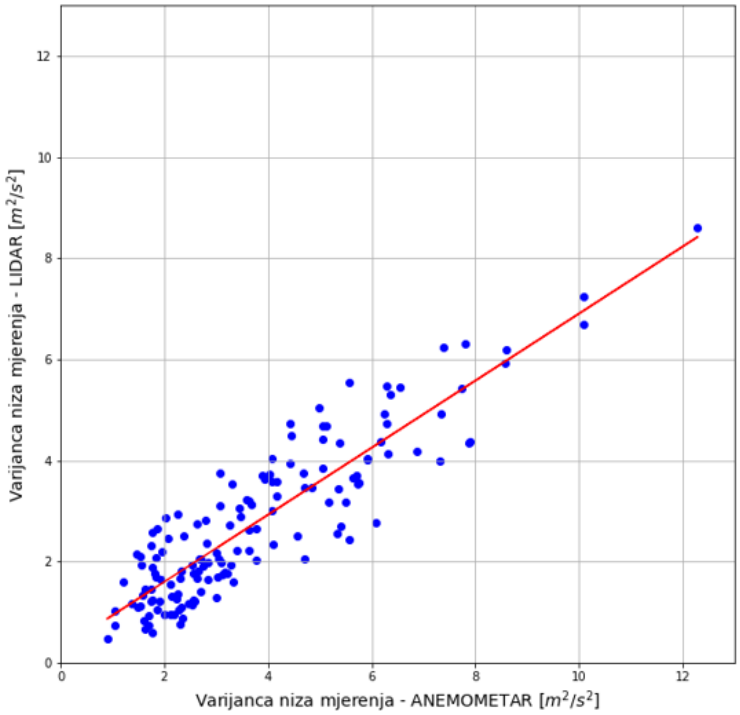
3.2.4. Revizija dobivenih rezultata za srednju vrijednost i varijancu niza mjerenja

S obzirom da je i za ovu epizodu bure dobivena linearna ovisnost varijance niza mjerenja LIDAR-a o varijanci niza mjerenja anemometra (slika 3.15), ovdje će se također za početak ukloniti 20% točaka koje najviše odstupaju od pravca. Zatim će se ponovno prikazati ovisnosti srednje vrijednosti niza mjerenja LIDAR-a o srednjoj vrijednosti niza mjerenja anemometra (slika 3.16) i varijance niza mjerenja LIDAR-a o varijanci niza mjerenja anemometra (slika 3.17) s preostalih 80% točaka. Na dobivenim grafovima se može vidjeti da je sada linearna ovisnost znatno očitija. Ponovno se to poglavito odnosi na ovisnost varijance niza mjerenja LIDAR-a o varijanci niza mjerenja anemometra s obzirom da su i kod ove epizode bure u početku dobivena znatno veća odstupanja od pravca kod nekih točaka prilikom razmatranja varijance niza mjerenja, nego što je to bio slučaj kod srednje vrijednosti niza mjerenja. Izračunate vrijednosti za jednadžbe pravca iznose: a = 0.953, b = 0.869 ms^{-1} (slika 3.16); a = 0.663, b = 0.273 m^2s^{-2} (slika 3.17). Nakon revizije, koeficijent korelacije između srednje vrijednosti niza mjerenja LIDAR-a i niza mjerenja anemometra iznosi: r = 0.942.

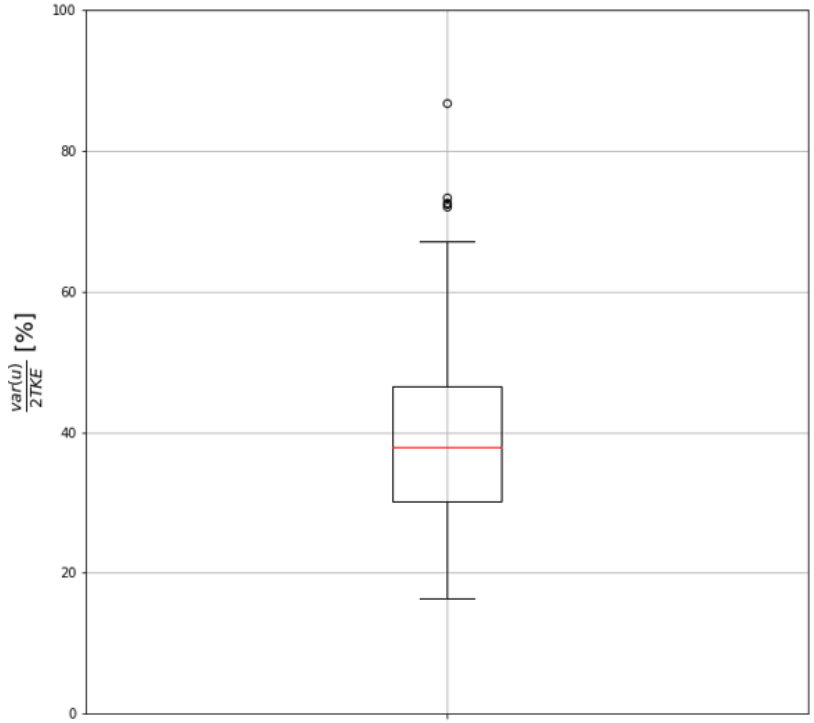
Za kraj će se i kod ove epizode bure izračunati omjer $\frac{\overline{u'^2}}{2TKE}$ za preostalih 80% nizova, kao što je to bilo napravljeno ranije u potpoglavlju 3.1.4 za prvu epizodu. Na slici 3.18 se nalazi kutijasti dijagram za navedeni omjer izražen u postotku.



Slika 3.16. Ovisnost srednje vrijednosti niza mjerenja LIDAR-a o srednjoj vrijednosti niza mjerenja anemometra (80% podataka) za epizodu bure koja je trajala od 15:00 (21.3.2018.) do 19:00 (22.3.2018.) na području zračne luke Dubrovnik



Slika 3.17. Ovisnost varijance niza mjerenja LIDAR-a o varijanci niza mjerenja anemometra (80% podataka) za epizodu bure koja je trajala od 15:00 (21.3.2018.) do 19:00 (22.3.2018.) na području zračne luke Dubrovnik



Slika 3.18. Kutijasti dijagram za omjer $\frac{\overline{u'^2}}{2TKE}$ (80% podataka) za epizodu bure koja je trajala od 15:00 (21.3.2018.) do 19:00 (22.3.2018.) na području zračne luke Dubrovnik

4. Zaključak

Jedan od najčešćih i najsnažnijih tipova vjetra na istočnoj obali Jadrana je bura. Po sinoptičkom tipu buru možemo podijeliti na ciklonalni, anticiklonalni i frontalni tip, dok s obzirom na visinu troposfere do koje bura prodire razlikujemo plitku i duboku buru. U ovom radu su analizirana mjerenja LIDAR-a i ultrazvučnog anemometra u neposrednoj blizini Dubrovačkog aerodroma za dvije epizode bure. LIDAR izravno mjeri radijalnu komponentu brzine vjetra na nekoliko udaljenosti, dok anemometar mjeri tri komponente brzine vjetra u standardnom koordinatnom sustavu u točki u kojoj se nalazi. Kako bi usporedba mjerenja bila moguća, trebalo je iz mjerenja anemometra izračunati radijalnu komponentu brzine vjetra. Mjerenja su podijeljena u nizove koji traju 1.5 ili 3.6 minuta (ovisno o epizodi kako je objašnjeno ranije).

Prije analize mjerenja, određen je tip bure. U određivanju sinoptičkog tipa korištene su prizemne sinoptičke karte, dok je u određivanju tipa s obzirom na visinu troposfere do koje bura prodire korišten vertikalni profil vjetra iz modela ALADIN. Kod obje epizode se radilo o ciklonalnom tipu plitke bure. Ciklonalni tip ukazuje da je u to vrijeme na istočnoj obali Jadrana bilo oblačno vrijeme (uz moguću oborinu), dok je za plitku buru karakteristično da joj se smjer i srednja brzina ne mijenjaju značajno tijekom epizode.

Za početak analize su nacrtani vremenski nizovi radijalne brzine vjetra jedan preko drugog za oba instrumenta kako bi usporedili mjerenja. Iz dobivenih grafičkih prikaza se kod obje epizode može vidjeti da se nizovi u velikoj mjeri preklapaju uz određena odstupanja. Zasigurno je jedan od razloga odstupanja činjenica da je zračna udaljenost između instrumenata iznosila 1.91 km, a u analizi su se sa mjerenjima anemometra uspoređivala mjerenja LIDAR-a na 1.931 km. Nadalje, prikazana je ovisnost radijalne brzine vjetra LIDAR-a o radijalnoj brzini vjetra anemometra (za obje epizode). Iz grafova se može vidjeti da je dobivena ovisnost ona koja najviše odgovara linearnoj, ali ipak valja obratiti pažnju na prilično velika odstupanja od pravca. U idućem koraku je promotrena ovisnost srednje vrijednosti niza mjerenja LIDAR-a o srednjoj vrijednosti niza mjerenja anemometra. U ovom slučaju se znatno jasnije može vidjeti da se radi o linearnoj ovisnosti.

Kod obje epizode nisu dobivena značajnija odstupanja od pravca. Također, dobivena je izuzetno jaka korelacija između ove dvije varijable.

Kao što je poznato od ranije, za račun TKE-a za pojedini niz mjerenja su potrebne varijance nizova komponenti brzine vjetra. Stoga je tražena ovisnost varijance niza mjerenja LIDAR-a o varijanci niza mjerenja anemometra. Iz rezultata je vidljivo da se kod obje epizode radi o linearnoj ovisnosti, no valja napomenuti da nekolicina točaka odstupa od pravca.

U završnom dijelu analize je napravljena revizija dobivenih rezultata za srednju vrijednost i varijancu niza mjerenja. Nakon što je uklonjeno 20% podataka koji najviše odstupaju od pravca na grafu gdje je prikazana ovisnost varijance niza mjerenja LIDAR-a o varijanci niza mjerenja anemometra, s preostalih 80% podataka su ponovno nacrtane ovisnosti srednje vrijednosti i varijance niza mjerenja LIDAR-a o srednjoj vrijednosti i varijanci niza mjerenja anemometra. Kao što je bilo i za očekivati, u oba slučaja je ponovno dobivena linearna ovisnost, ali sada su odstupanja točaka od pravca bila znatno manja, što je povećalo robusnost rezultata. Za kraj je prikazan kutijasti dijagram za omjer $\frac{\overline{u'^2}}{2TKE}$ iz kojeg je zanimljivo primijetiti da je medijan zastupljenosti prvog člana u ukupnom TKE-u kod prve epizode bure oko 30%, dok je kod druge epizode bure malo manji od 40% (medijan kod druge epizode je nešto veći).

U početku analize je pokazano da su mjerenja LIDAR-a itekako usporediva sa mjerenjima ultrazvučnog anemometra. Proučavanjem varijance niza mjerenja se moglo vidjeti da postoji potencijal u procjeni kinetičke energije turbulencije (TKE), koja je izračunata mjerenjima anemometra i pomoću mjerenja LIDAR-a. U daljnjim proučavanjima turbulencije bure bi od velike koristi bilo korištenje tri LIDAR-a. Na taj način bi se mogla dobiti informacija za sve tri komponente brzine vjetra, dok je u ovom radu analiza vršena samo za radijalnu komponentu (jer je korišten samo jedan LIDAR).

Literatura

Belušić, D. i Bencetić Klaić, Z. (2006). Mesoscale dynamics, structure and predictability of a severe Adriatic bora case. *Meteorologische Zeitschrift 15*, 157-168.

Golem, P., Večenaj, Ž., Kozmar, H., Grisogono, B. (2022). The Effect of Orography on Bora Wind Turbulence. *Boundary-Layer Meteorol 187*, 193–212

Hercigonja, L. (2022). Analiza vjetra na Mikrometeorološkoj postaji Maslenica. Diplomski rad, Prirodoslovno-matematički fakultet, Sveučilište u Zagrebu, 43.

Jurčec, V. (1988). The Adriatic frontal bora type. *Hrvatski meteorološki časopis 23* (23), 13–25.

Penzar, B., Penzar, I. i Orlić M. (2001). *Vrijeme i klima hrvatskog Jadrana.* Dr. Feleter

Stull, R.B. (1988). *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, the Netherlands, 666.

Šoljan, V., Belušić, A., Šarović, K., Nimec, I., Brzaj, S., Suhin, J., Belavić, M., Večenaj, Ž. i Grisogono, B. (2018). Micro-scale properties of different bora types. *Atmosphere 9*(4), 25.

Večenaj, Ž. (2005). Procesi makrorazmjera kod olujnog vjetra u Dalmaciji. Diplomski rad, Prirodoslovno-matematički fakultet, Sveučilište u Zagrebu.

Večenaj, Ž. (2012). *Characteristics of the bora related turbulence*. Doktorski rad, Prirodoslovno-matematički fakultet, Sveučilište u Zagrebu.

Večenaj, Ž., Grisogono, B. i Prtenjak, M. T. (2020). Study of turbulence – Sesar 2020. Prirodoslovno-matematički fakultet, Sveučilište u Zagrebu i HKZP, 92.