

# Prognoziranje udara bure na temelju izlaznih polja modela ALADIN na Zračnoj luci Dubrovnik

---

Simić, Niko

Master's thesis / Diplomski rad

2019

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:406163>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-14**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
GEOFIZIČKI ODSJEK

Niko Simić

**PROGNOZIRANJE UDARA BURE  
NA TEMELJU IZLAZNIH POLJA  
MODELA ALADIN NA ZRAČNOJ LUCI  
DUBROVNIK**

Diplomski rad

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
GEOFIZIČKI ODSJEK

SMJER: METEOROLOGIJA I FIZIČKA OCEANOLOGRAFIJA

**Niko Simić**

Diplomski rad

**Prognoziranje udara bure  
na temelju izlaznih polja  
modela ALADIN na Zračnoj luci Dubrovnik**

Voditelj diplomskog rada: doc. dr. sc. Željko Večenaj

Ocjena diplomskog rada:

\_\_\_\_\_

Povjerenstvo:

1

\_\_\_\_\_

2

\_\_\_\_\_

3

\_\_\_\_\_

Datum polaganja:

*„We confuse the world as talked about, described, and measured with the world which actually is.“*

Alan Wilson Watts

## Sažetak

### PROGNOZIRANJE UDARA BURE NA TEMELJU IZLAZNIH POLJA MODELA ALADIN NA ZRAČNOJ LUCI DUBROVNIK

Cilj ovog rada bio je pokušati pronaći prikladan parametar za prognozu udara bure na Zračnoj luci Dubrovnik (ZLD) iz ALADIN modela rezolucija 4 km i 8 km. U tu svrhu korišteni su podatci epizoda bura u razdoblju od 15. prosinca 2017. do 31. ožujka 2018. izmjereni pomoću dva anemometra na ZLD.

Iz izmjerenih podataka je izračunata kinetička energija turbulencije (TKE) i viskozna disipacija  $\varepsilon$ . Potvrđena je linearno rastuća veza izmjerenih udara i  $\sqrt{\text{TKE}}$  kao i  $\varepsilon \sim \text{TKE}^{\frac{3}{2}}$ . Iz spomenutog slijedi da je  $\varepsilon^{\frac{1}{3}}$  proporcionalan brzini udara što je i potvrđeno.

Uspoređeni su TKE ALADIN-a s izmjerenim TKE-om, kao i horizontalna komponenta brzine vjetra ALADIN-a s brzinom udara i izmjerenim TKE. Usporedbe su napravljene u vremenskoj domeni i pomoću dijagrama raspršenja.

U vremenskoj domeni pokazalo se da modelirane veličine ne procjenjuju dobro varijacije izmjerenih veličina. Dodatno, TKE ALADIN-a redovito potcjenjuje izmjerene TKE.

U dijagramima raspršenja, pokušano je statistički pristupiti prognozi izmjerenih veličina pomoću modeliranih. Pokazalo se da su problemi takvom pristupu velika varijanca medijana dijagrama raspršenja i na nekim područjima povećan interkvartilni raspon.

Uočena je sličnost oblika krivulja dijagrama raspršenja izmjerenih veličina i veličina iz modela vezanih uz N tip i SM tip bure (N tip je otvoreni tip bure koji se proteže kroz cijelu troposferu, a SM tip se odnosi na standardni model). Postavilo se pitanje jesu li spomenuti oblici posljedica varijance uzorkovanja ili su posljedica toga da N tip i SM tip bure imaju svoju fenomenologiju. U tu svrhu, proveden je test usporedbom krivulja dijagrama raspršenja oba tipa bure s nasumično odabranim skupovima bura. Za N tip je potvrđeno da oblik krivulje nije posljedica varijance uzorkovanja, dok za SM tip zbog premalog uzorka ne-SM tipa bure nije se moglo ništa zaključiti.

Ključne riječi: Bura; Zračna luka Dubrovnik; ALADIN; TKE

# ***Abstract***

## **BORA GUSTS FORECASTING USING ALADIN MODEL OUTPUTS AT THE DUBROVNIK AIRPORT**

The goal of this paper is to try and find the most adequate ALADIN model parameter for forecasting bora gusts at Dubrovnik Airport. Data used came from two anemometers placed at Dubrovnik Airport during the period of December 15<sup>th</sup> 2017—March 31<sup>st</sup> 2018.

Turbulence kinetic energy (TKE) was calculated as well as its viscous dissipation rate  $\epsilon$ . Several links were confirmed: linear relationship between bora gust speed and  $\sqrt{\text{TKE}}$  and  $\epsilon^{\frac{1}{3}}$  as well as  $\epsilon^{\frac{1}{3}}$  proportionality with bora gust speed.

In time domain and using scatter plots, we compared various variables: TKE parametrised from ALADIN with TKE derived from measurements, ALADIN horizontal wind component with gust speed and measurement-derived TKE.

Modeled variables do not successfully estimate those derived from measurements in time domain. Additionally, ALADIN TKE typically underestimates measured TKE.

A statistical approach was used concerning scatter plots. Forecasting using statistical approach was found to be defective due to large median variance and, for certain values, increased interquartile range.

We also observed similar shapes of the curves regarding N and SM types of bora wind in scatter plots (N type bora extends through the entire troposphere, and the SM type refers to standard model bora). A question arised whether the aforementioned shapes were the result of sampling variance or the phenomenology of bora types. Curves associated with N and SM boras were compared with randomly selected bora episodes. For the N type, it has been successfully verified that the shape of the curve is not a consequence of sampling variation, while for the SM type no conclusion was found owing to too small non-SM type sample size.

Keywords: Bora; Dubrovnik Airport; ALADIN; TKE

## **Zahvale**

Za početak, zahvalio bih se doc. dr. sc. Željku Večenaju na bezgraničnoj strpljivosti u radu.

Osobno nisam ni slutio da projekt ovakvog opsega može teći ovoliko glatko i ugodno, a uzrok tome mislim da leži u dvije karakteristike koje je doc. dr. sc. Večenaj redovito unosio u rad:

- kontinuirana i sustavna podjela rada na manje cjeline omogućila je iznimnu preglednost kako samog rada, tako i njegovog stavljanja u vremenski kontekst,
- dozvoljavanje slobode; kako od odabira korištenih metoda, preko tumača podataka i njihovog stavljanja u teorijski kontekst, tako i do samih zaključaka koji se donose i smjera u kojem rad napreduje.

Dodatno, htio bih reći da je doc. dr. sc. Večenaj uvijek bio prisutan u slučaju nedoumica i navodio me na pravi put sa izuzetnom strpljivosti i razumijevanjem za moje nerazumijevanje.

Zahvaljujući doc. dr. sc. Željku Večenaju na kraju s radošću mogu pozitivno odgovoriti na najbitnije pitanje koje geofizika postavlja geofizičaru: je li bilo zabavno?

# Sadržaj

1 Uvod .....	10
1.1 Motivacija .....	10
1.2 Teorijski uvod.....	11
2 Podatci .....	13
2.1 Kontrola kvalitete podataka .....	15
2.1.1 Apsolutne granice.....	16
2.1.2 Šiljci.....	17
3 Rezultati i diskusija.....	19
3.1 Vremenska skala usrednjenja .....	19
3.2 Rotacija koordinatnog sustava.....	24
3.3 Usporedba s ALADIN modelom .....	25
3.3.1 Usporedba TKE modela i TKE mjerenja.....	25
3.3.2 Usporedba horizontalne komponente brzine vjetra modela i udara mjerenja .....	29
3.4 Račun viskozne disipacije.....	35
3.4.1 Provjere računa viskozne disipacije .....	37
3.4.1.1 Lokalna izotropnost.....	37
3.4.1.2 Veza viskozne disipacije i TKE .....	38
3.4.1.3 Viskozna disipacija različitih komponenata brzina vjetra .....	39
3.5 Veza udara s TKE i $\frac{1}{\varepsilon^3}$ .....	41
4 Zaključak.....	43
5 Bibilografija.....	45



## Popis kratica

<b>ALADIN</b>	<b>A</b> ire <b>L</b> imitée <b>A</b> daptation (dynamique) <b>D</b> éveloppement <b>I</b> nter <b>N</b> ational
<b>FFT</b>	<b>F</b> ast <b>F</b> ourier <b>T</b> ransform
<b>IDM</b>	metoda inercijske disipacije (engl. <i>Inertial Dissipation Method</i> )
<b>N</b>	otvoreni tip bure (N označava smjer)
<b>PMF</b>	<b>P</b> rirodoslovno- <b>m</b> atematički <b>f</b> akultet
<b>SM</b>	<b>S</b> tandardni <b>M</b> odel
<b>TKE</b>	Kinetička energija turbulencije (engl. <i>Turbulence Kinetic Energy</i> )
<b>ZLD</b>	<b>Z</b> račna <b>L</b> uka <b>D</b> ubrovnik

## Popis simbola i konstanti

$f$	frekvencija Hz	Hz
$k$	valni broj u smjeru puhanja Popis kratica	$m^{-1}$
$S_i$	spektralna gustoća brzine $i$	$m^2s^{-2}/Hz$
TKE	kinetička energija turbulencije	$m^2s^{-2} (Jkg^{-1})$
$\bar{U}$	srednja brzina vjetra u smjeru puhanja	$ms^{-1}$
$u$	brzina vjetra u smjeru puhanja	$ms^{-1}$
$v$	brzina vjetra okomita na smjer puhanja	$ms^{-1}$
$w$	vertikalna komponenta brzine	$ms^{-1}$
$\varepsilon$	viskozna disipacija	$m^2s^{-3}$
$\Lambda$	empirijska duljina skale turbulencije	m
$\alpha_i$	Kolmogorova konstanta komponente $i$	0,53 [/]

# 1 Uvod

## 1.1 Motivacija

Općenito, bura je mahovit, silazni vjetar koji puše sa sjeveroistoka u zavjetrini Dinarida (npr. Makjanić, 1978; Smith, 1987; Lepri i sur. 2017). Kao posljedica ALPEX projekta, dinamičko objašnjenje bure leži u hidrauličkoj teoriji. Vjetrovi sličnih dinamičkih svojstava postoje i drugdje u svijetu — npr. na zapadnoj obali Meksika buri je sličan 'Tehuantepecer', a u Japanu vjetar na zavjetrinskoj strani japanskog otočja zvan 'Oroshi' (Yoshino, 1976).

Zbog posebnih orografskih svojstava i položaja, Zračna luka Dubrovnik (ZLD) izložena je čestim naletima bure (Drobac, 2006). Takvi uvjeti otežavaju uzlijetanje i polijetanje zrakoplova. Hrvatska kontrola zračne plovidbe koristi prognoze modela ALADIN/HR (*Aire Limitée Adaptation dynamique Développement InterNational*) u svrhu predviđanja brzine vjetra na uzletno sletnoj stazi. Cilj ovog rada je pronaći pouzdanije parametre za predviđanje brzine vjetra u slučajevima bure na ZLD, s naglaskom na brzinu udara.

Jedan od tih parametara može biti kinetička energija turbulencije (TKE). Ona je jedna od najbitnijih veličina u mikrometeorologiji jer daje mjeru intenziteta turbulencije (npr. Stull, 1988a). Prilikom epizode bure, povećanje TKE je vezano uz povećanje srednje brzine vjetra i brzine udara. ALADIN/HR model prognozira TKE što se može iskoristiti za procjenu prethodno spomenutih veličina. Istražit ćemo vezu između TKE izvedene na osnovi mjerenja i prognozirane TKE ALADIN/HR modelom, i izvedene TKE na osnovi mjerenja i prognoziranih brzina i udara bure.

Za ovaj rad, bitno je spomenuti klasifikaciju bure na ZLD na: standardni model bure (SM) i otvorenu buru (N) (Drobac, 2006). SM bura puše u nižoj troposferi, dok se N tip bure proteže kroz cijelu troposferu. S obzirom na statistička obilježja, SM tip bure traje duže, ima veću srednju brzinu, i manje varijacije smjera i brzine od N tipa bure (Keresturi, 2014). Valja naglasiti da tijekom jedne epizode puhanja bure, bura može prijeći iz jednog tipa u drugi.

## 1.2 Teorijski uvod

Teorija turbulencije, kao i ova koja se primjenjuje na buru, izvedena je u prostornoj domeni. Za primjenu takve teorije na npr. anemometar koji se nalazi u jednoj prostornoj točki, ali mjeri u vremenu, koristi se Taylorova hipoteza. Taylorova hipoteza zahtijeva „zamrznutost turbulencije“, što se u praksi postiže kada  $\sigma_M < 0,5 \cdot M$  gdje je sa  $\sigma_M$  označen korijen varijance horizontalne brzine vjetra  $M$  (npr. Stull, 1988b).

Za određivanje perturbacija komponenata brzina vjetra  $u'$ ,  $v'$ , i  $w'$ , potrebno je odrediti vremensku skalu usrednjenja. Za to, u spektru gustoće brzine (npr. Stull, 1988c) može se vidjeti postojanje energijskog procjepa koji dijeli dio spektra proizvedenog od gibanja na mezoskali i dio spektra koji dolazi od turbulentnih gibanja.

Jednom kada imamo perturbacije, lako računamo TKE po jedinici mase kao jednu polovinu zbroja kvadriranih perturbacija komponenata brzina vjetra (npr. Stull, 1988a).

Pojedini članovi u prognostičkoj jednadžbi TKE sudjeluju u proizvodnji ili smanjenju TKE. Jedan od njih je i član viskozne disipacije  $\varepsilon$  koji se može koristiti za kratkoročne prognoze (engl. *nowcasting*) na zračnim lukama (Frech, 2007). Viskoznu disipaciju  $\varepsilon$  najčešće ne možemo računati direktno, već primjenjujemo metodu inercijske disipacije (engl. *inertial dissipation method*, IDM) (Tennekes i Lumley, 1972). Kolmogorov je pokazao da za spektar gustoće energije  $S_i$  u inercijalnom području vrijedi:

$$S_i(k) = \alpha_i \cdot \varepsilon^{\frac{2}{3}} \cdot k^{-\frac{5}{3}} \quad , \quad (1.1)$$

gdje je  $s$   $k$  označen valni broj, s  $\alpha_i$  Kolmogorova konstanta  $i$ -te komponente brzine, i s  $\varepsilon$  viskozna disipacija. Po Batcheloru (1953) i Champagneu (1978), potpuno inercijsko područje je postignuto ako omjeri spektara  $\frac{S_w}{S_u}$  i  $\frac{S_v}{S_u}$  postiču iznos  $\frac{4}{3}$ . Po Champagneu (1978) i Mestayer (1982), zakon Kolmogorova „ $-\frac{5}{3}$ “ vrijedi i izvan inercijskog područja na što ćemo se osloniti u ovom radu.

Logaritmiranjem (1.1) i korištenjem Taylorove hipoteze dobivamo (detaljnije u npr. Babić, 2013):

$$\varepsilon = \frac{2\pi}{\bar{U}} \left[ \frac{f^{\frac{5}{3}} \cdot S_i(f)}{\alpha_i} \right]^{\frac{3}{2}}.$$

Sa  $\bar{U}$  je označena srednja brzina u smjeru puhanja vjetra,  $f$  označava frekvenciju,  $S_i(f)$  označava spektar gustoće brzine komponente  $i$ ,  $\alpha_i$  Kolmogorovljevu konstantu vezanu uz komponentu vjetra  $i$ , a sa  $[\cdot]$  je označena srednja vrijednost funkcije.

Za Kolmogorovljevu konstantu može se pretpostaviti vrijednost 0,53 (Williams, 1974; Champagne 1978; Oncley i sur., 1996; Dyer i Hicks, 1982).

Mellor i Yamada (1974) su pokazali da se viskozna disipacija  $\varepsilon$  u slučaju barem približno homogene turbulencije može parametrizirati kao

$$\varepsilon = \frac{\text{TKE}^{\frac{3}{2}}}{\Lambda},$$

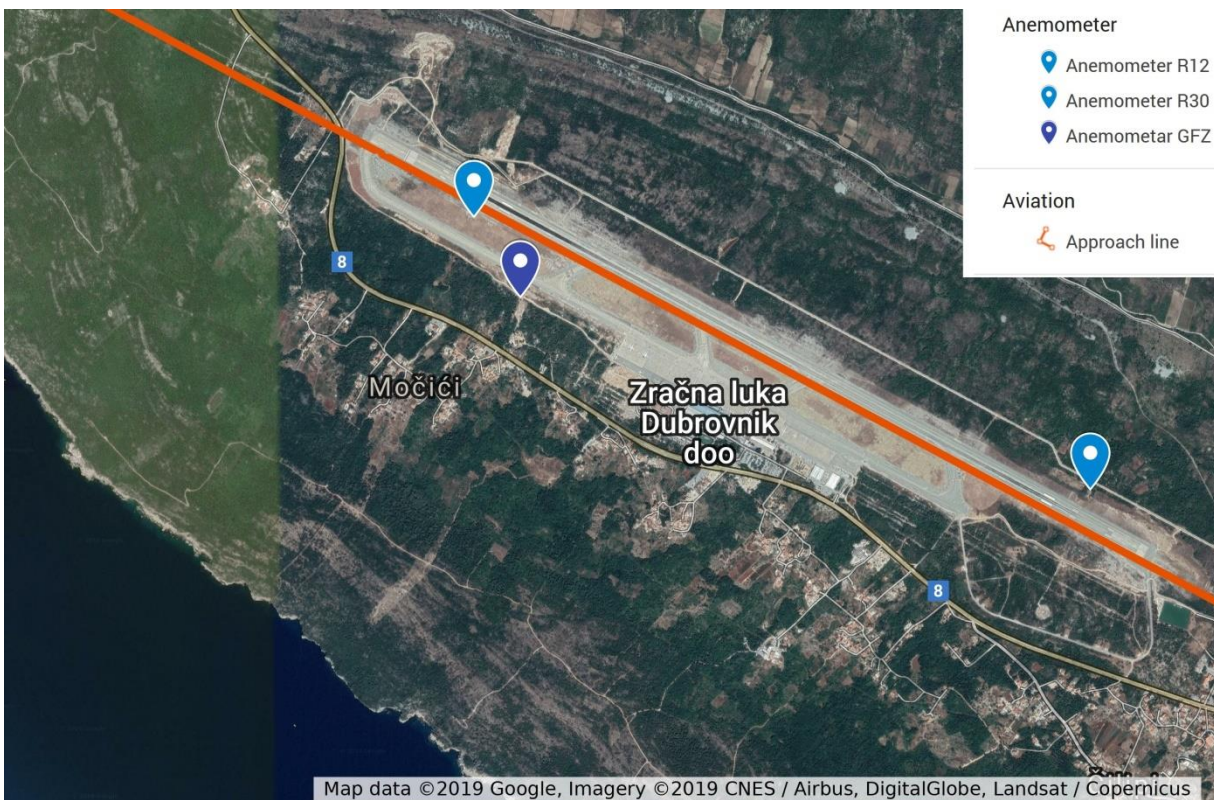
gdje je  $\Lambda$  empirijska duljina skale turbulencije. Ovako izračunatu viskoznu disipaciju  $\varepsilon$  možemo koristiti za eventualnu potvrdu robusnosti (1.2).

## 2 Podatci

Korišteni su podatci epizoda bura u razdoblju od 15. prosinca 2017. do 31. ožujka 2018. ustupljeni od Geofizičkog odsjeka PMF-a (tablica 2.1). Epizoda bure je proglašena ako duže od dva sata:

- 10-minutni srednjak smjera vjetra je unutar intervala  $[0^\circ - 70^\circ]$ ,
- 10-minutni srednjak brzine vjetra je veći od  $10 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ .

Mjerenje je provedeno pomoću dva "WindMaster Pro" ultrasonična anemometra (WindMaster and Windmaster Pro User Manual 2017), postavljena na visinama 3 m, i 10 m. Svaki anemometar mjeri brzinu vjetra podijeljene u tri okomite komponente (dvije horizontalne i vertikalna) frekvencijom uzorkovanja 10 Hz. Anemometri su smješteni na 10-metarskom tornju pored piste ZLD na koordinatama  $(42,564^\circ \text{ S})$  i  $(18,254^\circ \text{ I})$  (slika 2.1).



Slika 2.1: Satelitska slika ZLD s označenim položajem anemometara (ljubičasto).

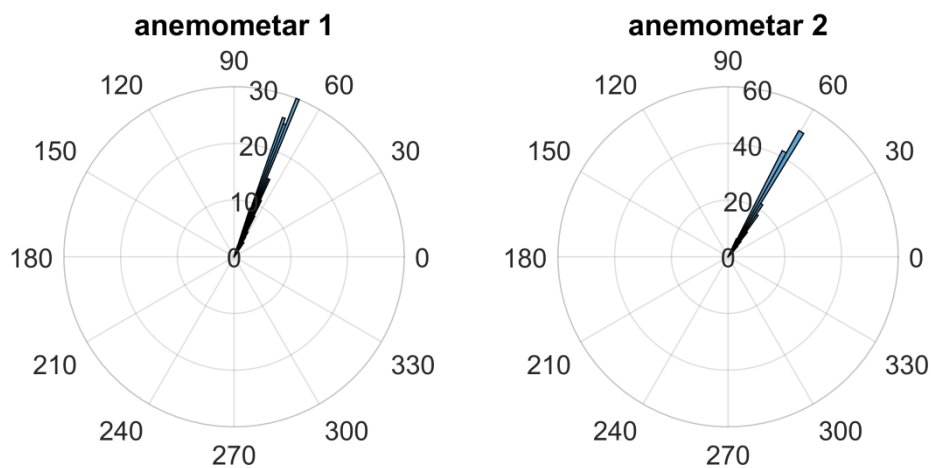
Izvor: Google LLC.

Tablica 2.1: Epizode bura u razdoblju od 15. prosinca 2017. do 31. ožujka 2018. preuzete od Geofizičkog odsjeka PMF-a, i njihove osnovne karakteristike. Tip bure je procijenjen pomoću pseudoTEMP-a ustupljenog od Geofizičkog odsjeka PMF-a.

<b>Naziv</b>	<b>Datum</b>	<b>Vrijeme (UTC)</b>	<b>Max brzina [<math>\text{ms}^{-1}</math>]</b>	<b>Max Udar [<math>\text{ms}^{-1}</math>]</b>	<b>Udari</b>	<b>Tip bure</b>
<b>1a</b>	17.12.2017.	11:00-14:00	12	14	rijetki	SM
<b>1b</b>	18.12.2017.	17:00-8:30	14	17	rijetki	SM
<b>2</b>	18.–19.12.2017.	17:00-8:30	12	16	rijetki	SM
<b>3</b>	19.–20.12.2017.	21:30-1:30	11	16	rijetki	N
<b>4</b>	20.–22.12.2017.	20:00-0:00	15	21	učestali	SM
<b>5</b>	29.12.2017.	12:30-16:30	12	16	poneki	SM
<b>6</b>	2.–3.01.2018.	19:30-4:00	14	21	učestali	SM
<b>7</b>	21.–22.1.2018.	19:00-8:00	20	31	učestali	N
<b>8</b>	23.–24.1.2018.	22:00-5:00	15	25	učestali	N
<b>9</b>	10.–11.2.2018.	14:30-6:00	16	21	učestali	SM
<b>10</b>	15.2.2018.	0:30-8:30	15	19	povremeni	/
<b>11</b>	15.2.2018.	17:30-19:30	11	13	bez	SM
<b>12</b>	24.2.2018.	1:30-7:00	12	15	bez	SM
<b>13a</b>	24.–25.2.2018.	18:00-8:00	13	19	rijetki	SM
<b>13b</b>	25.–26.2.2018.	8:00-9:00	15	21	učestali	SM
<b>14</b>	21.–22.3.2018.	14:00-18:00	19	27	učestali	SM

## 2.1 Kontrola kvalitete podataka

Horizontalne komponente brzine vjetra transformirane su u desni koordinatni sustav s ordinatom usmjerenom prema sjeveru. Vizualnom provjerom (slika 2.2), vektor smjera brzine vjetra nalazi se unutar  $[0^\circ - 70^\circ]$  što odgovara definiciji bure na stranici 13.



Slika 2.2: Polarni histogrami 10-minutnih srednjaka sirovih podataka svih epizoda bure zarotiranih u desni koordinatni sustav sa ordinatom usmjerenom prema sjeveru. Plavom su označene relativne čestine smjera bura unutar brojne kružnice. Lijeva slika se odnosi na anemometar postavljen na 10 m („anemometar 1“), a desna na anemometar na 3 m („anemometar 2“).

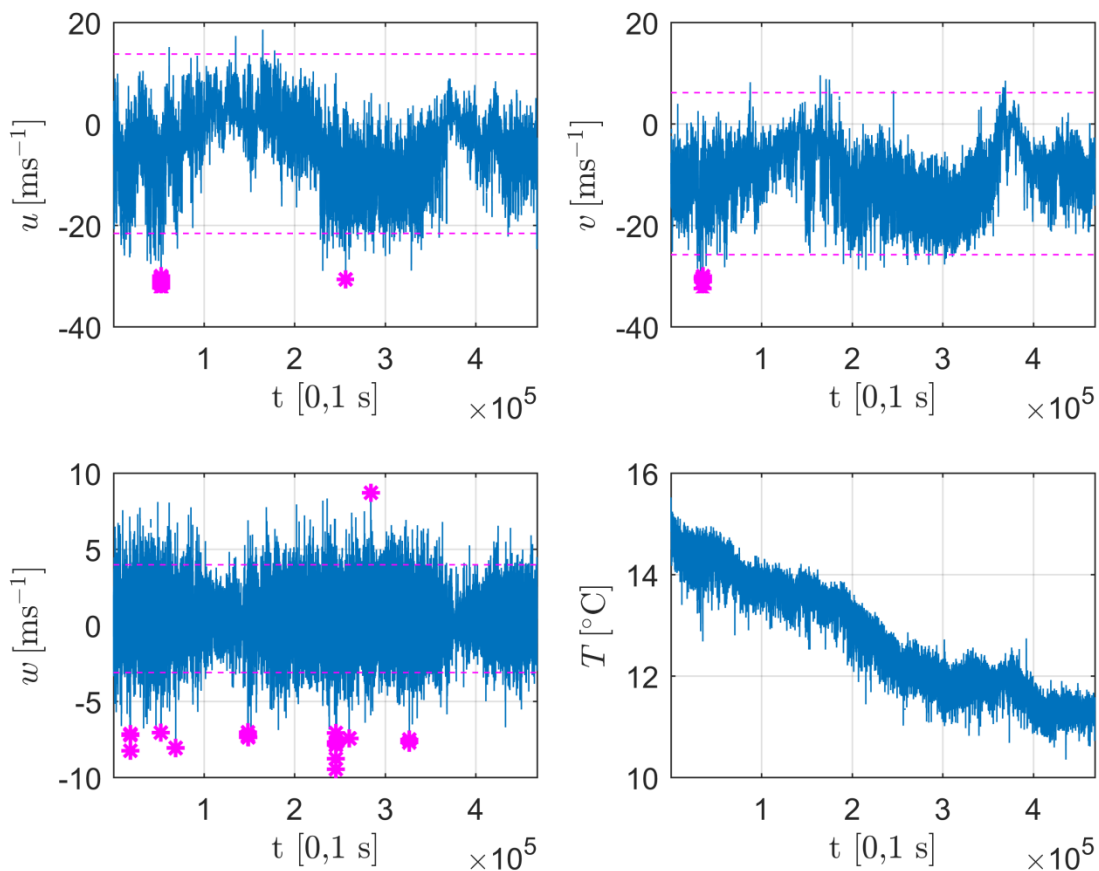
Uvjet za epizodu bure je da se 10-minutni srednjaci brzine vjetra na visini 10 metara nalaze unutar intervala  $[0^\circ - 70^\circ]$ . Uočljivo je da podatci niže postavljenog anemometra („anemometar 2“) zadovoljavaju spomenuti uvjet.



Zbog pogrešaka instrumenta pri mjerenju (npr. zbog kapljica vode na anemometru), potrebno je provesti kontrolu kvalitete podataka. Provedena su dva tipa uvjeta uklanjanja podataka (po Vickers i Mahrt, 1997): apsolutne granice i šiljci.

### 2.1.1 Apsolutne granice

Na slici 2.3 uočljive su nerealistične vrijednosti bure pripisane pogreškama u mjerenju. Vizualnom usporedbom, odabrane su nefizičke vrijednosti izvan kojih se mjerenja smatraju pogreškom anemometra. Vrijednosti su definirane u tablici 2.2.



Slika 2.3: Sirovi podatci komponenta brzina vjetra zarotiranih u desni koordinatni sustav sa ordinatom usmjerenom prema sjeveru i sonične temperature na 10 m visine tijekom epizode "bure 7" (tablica 2.1).  $u$ ,  $v$ , i  $w$  označavaju komponente brzine (popis simbola i konstanti). Crtkana linija označava raspon tri standardne devijacije ukupnog niza podataka centrirane oko srednjaka. Zvezdicom su označeni podatci koji nisu zadovoljili uvjet apsolutnih granica.

### 2.1.2 Šiljci

Da bismo neku vrijednost proglasili šiljkom, mora zadovoljavati dva uvjeta:

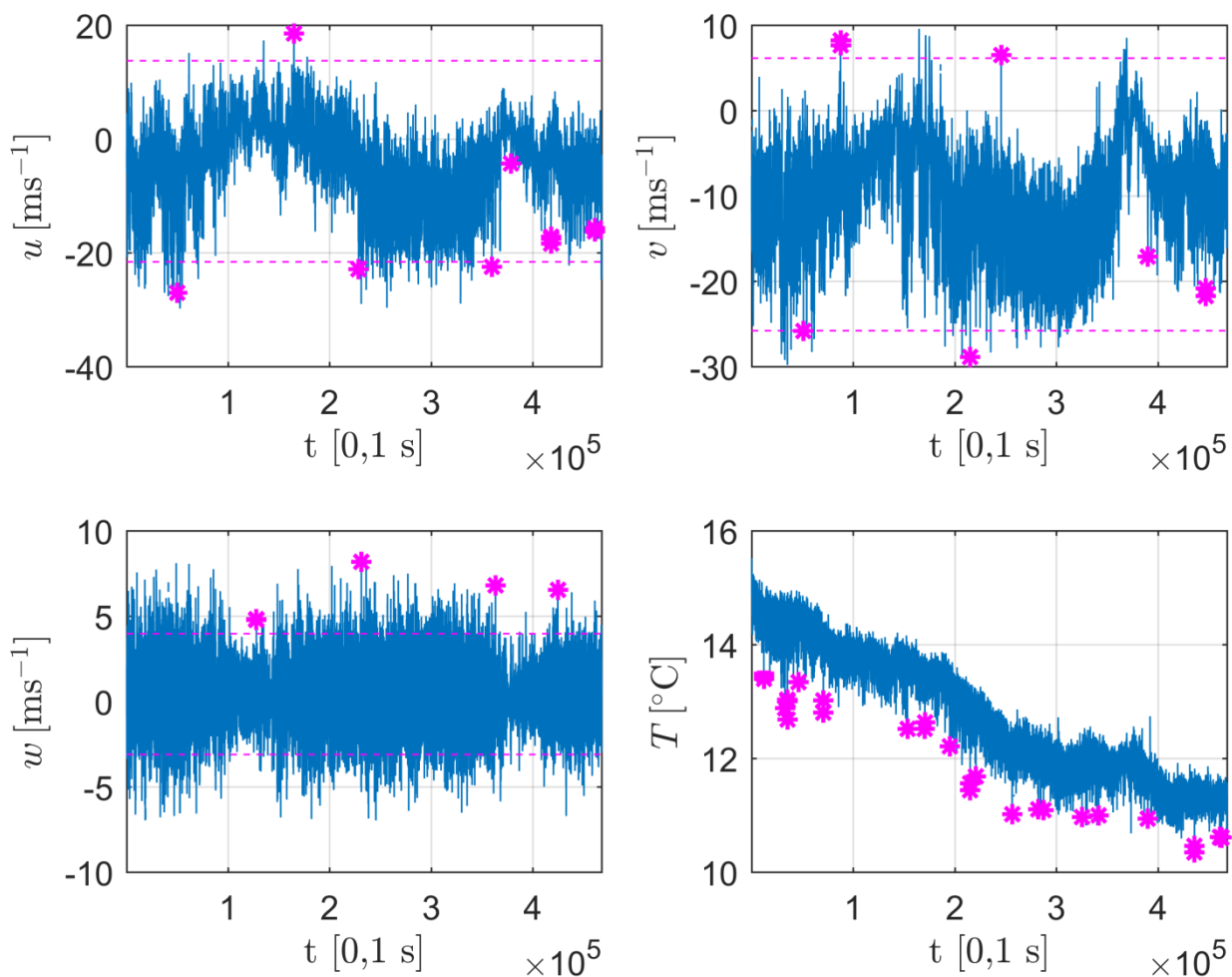
- iznos brzine se nalazi izvan intervala  $[\bar{x} - a \cdot \sigma_x, \bar{x} + a \cdot \sigma_x]$ , gdje je  $\bar{x}$  klizni srednjak duljine prozora 5 minuta centriranog oko vrijednosti koju provjeravamo;  $\sigma_x$  je standardna devijacija brzine na tom intervalu;  $a$  je proizvoljno odabrana konstanta.
- Maksimalno tri susjedne vrijednosti smiju zadovoljavati prethodni uvjet.

Proces eliminacije šiljaka se provodi uzastopno; novi niz proizveden uklanjanjem šiljaka ponovno se podvrgava istom postupku uz preskakanje uklonjenih vrijednosti. Postupak staje kada više nema podataka koji se smatraju šiljcima.

Konstante  $a$  (tablica 2.2) su odabrane tako da udio uklonjenih podataka ne prelazi 1 % ukupnog niza epizode bure. Subjektivnom provjerom (slika 2.4), postupak uspješno uklanja šiljke, a ne zahvaća ostale podatke.

Tablica 2.2: Apsolutne granice brzine vjetra i konstante  $a$  za odabir šiljaka. Apsolutne granice su odabrane vizualnom inspekcijom, a konstante  $a$  uvjetom da udio uklonjenih podataka procesom eliminacije šiljaka ne prelazi 1 % ukupnog niza epizode bure.

	$aps_{\min} [ms^{-1}]$	$aps_{\max} [ms^{-1}]$	$a [ / ]$
<b>horizontalno</b>	- 30	19	4,5
<b>vertikalno</b>	- 7	8, 5	6,1



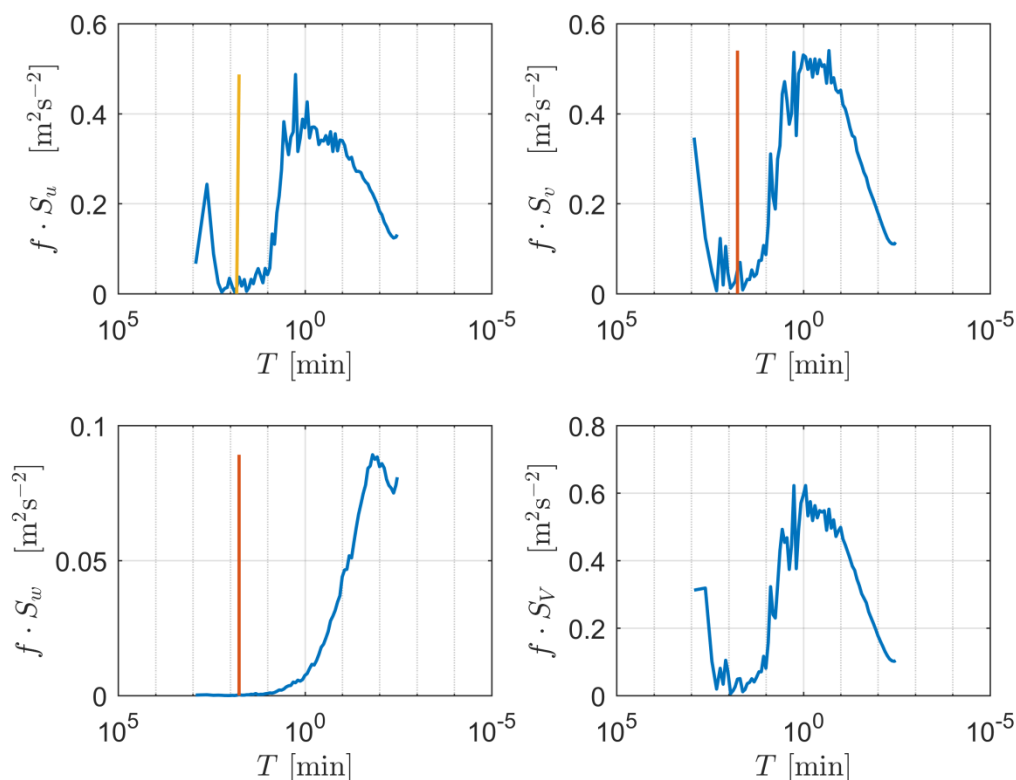
Slika 2.4: Sirovi podatci komponenta brzina vjetra zarotiranih u desni koordinatni sustav sa ordinatom usmjerenom prema sjeveru i sonične temperature na 10 m visine tijekom epizode "bure 7" (tablica 2.1) na kojima je provedena kontrola šiljaka.  $u$ ,  $v$ , i  $w$  označavaju komponente brzine (popis simbola i konstanti). Crtkana linija označava raspon tri standardne devijacije ukupnog niza podataka centrirane oko srednjaka. Zvezdicom su označeni podatci koji nisu zadovoljili uvjet šiljaka. Subjektivnom provjerom, postupak uspješno uklanja šiljke, a ne zahvaća ostale podatke.

## 3 Rezultati i diskusija

### 3.1 Vremenska skala usrednjenja

Za procjenu vremenske skale usrednjavanja, na komponente brzine vjetra prvo je primijenjen brzi Fourireov transformat (engl. *fast Fourier transform*, FFT). Spektar je zatim frekvencijski izgladen (Kaimal i Finnigan, 1994a) s osam točaka po dekadi (dekada je povećanje veličine za faktor deset).

Perturbacije brzina vjetra određene su preko spektralnih procjepa (npr. Stull, 1988c). Eksplicitno, u frekvencijski otežanom spektru ( $\log-f - f \cdot S(f)$  graf; slika 3.1), uočljiv je jasan spektralni procjep koji dijeli mezoskalna gibanja od turbulentnih. Vizualno uspoređujući bure u radu, određeno je da dijele spektralni procjep na 30-minutnom periodu.



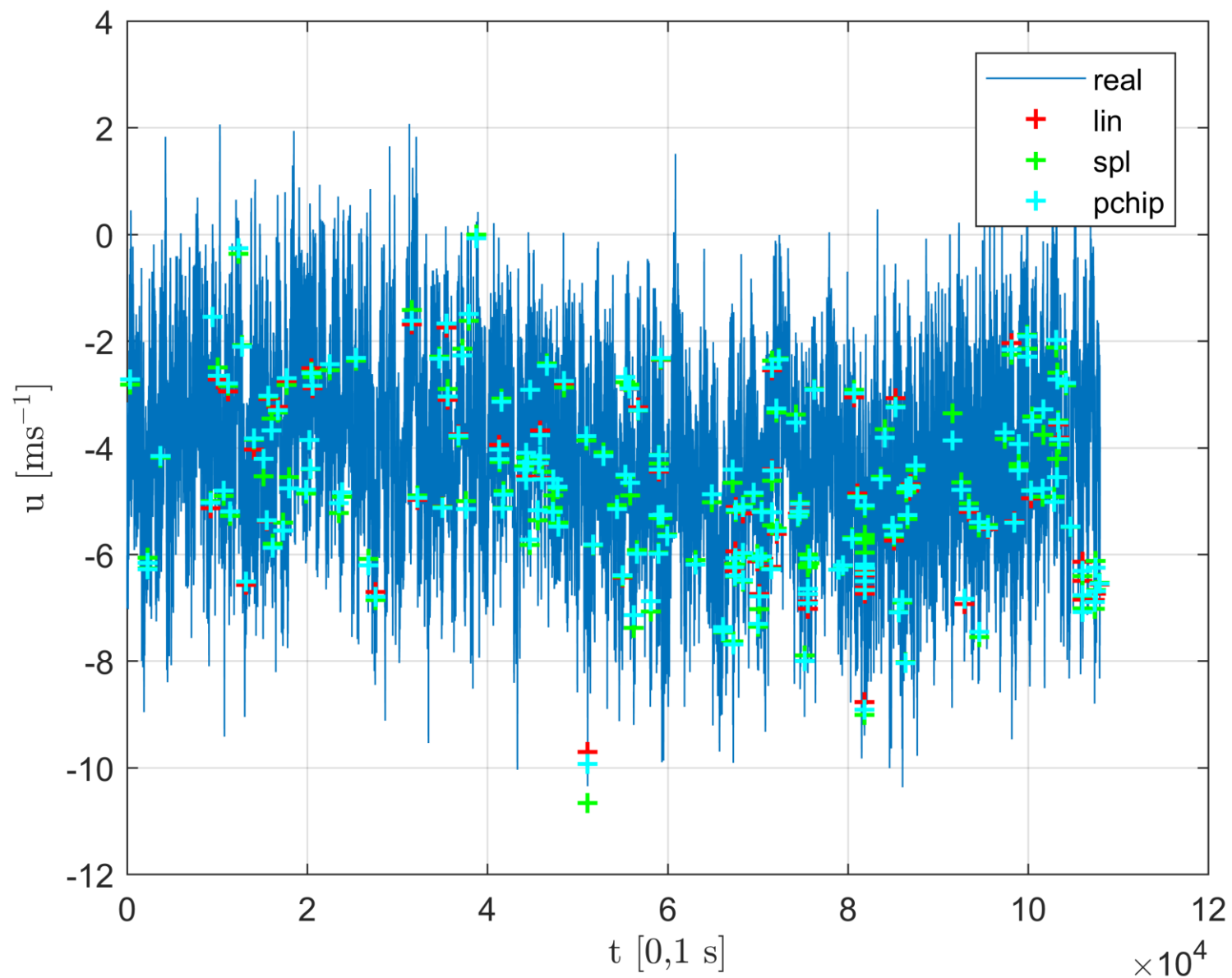
Slika 3.1: Grafovi frekvencijski otežanih spektara komponenti brzina vjetra na 3 m tijekom epizode "bure 13a" (tablica 2.1). Sa  $S_V$  je označena horizontalna komponenta brzine vjetra. Uočljiv je energijski procjep na 30-minutnom periodu (vertikalne linije). Ostale bure u radu pokazuju sličan minimum frekvencijski otežanog spektra pri 30-minutnom periodu.

### 3.1.1 Odabir vrste interpolacije pri određivanju vremenske skale usrednjenja

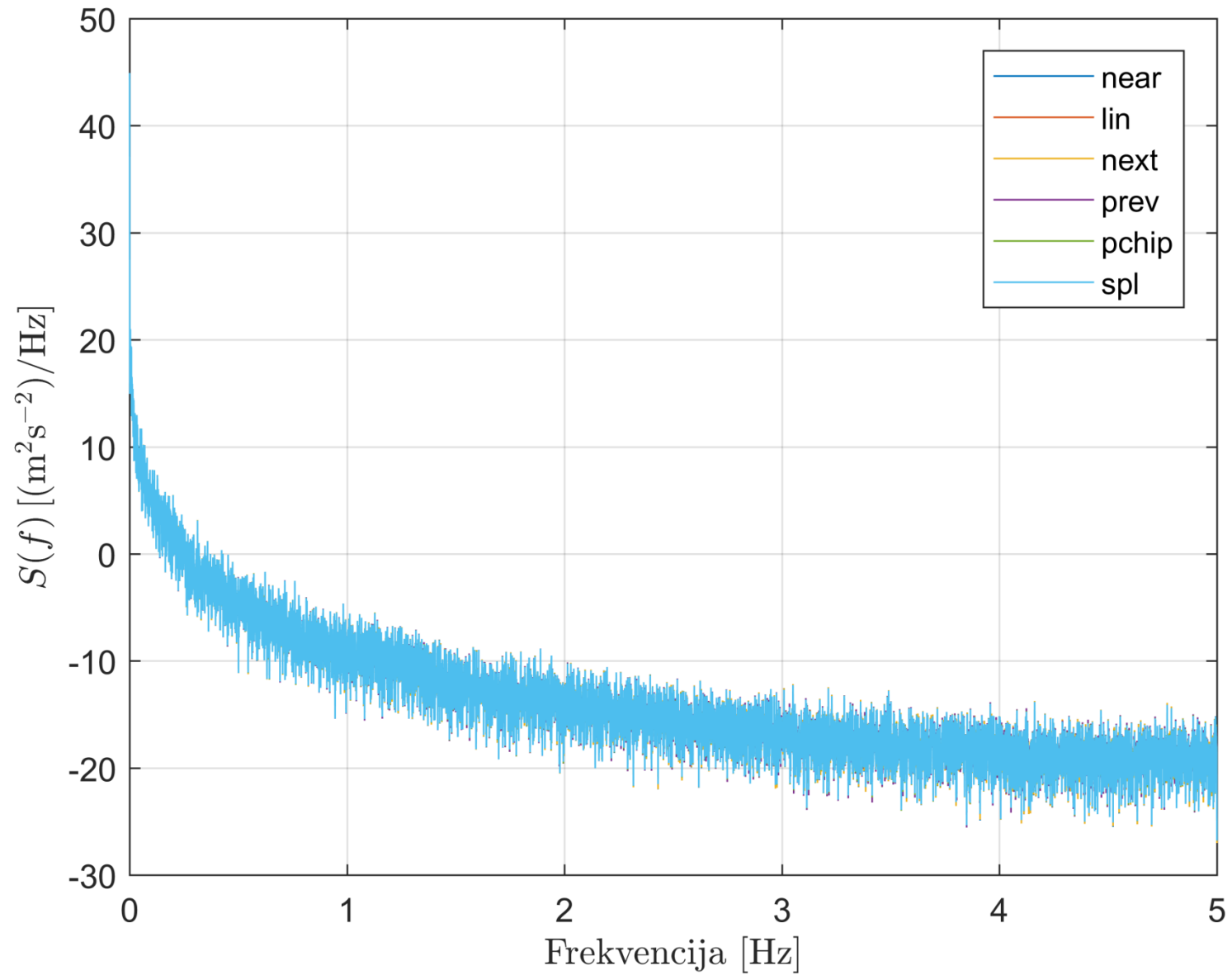
Da bi se proveo izračun spektra vremenskih nizova, podatci trebaju biti ekvidistantni u vremenu. Početni nizovi s kojima radimo nisu ekvidistantni zbog uklonjenih podataka pri kontroli kvalitete i zato što neki podatci nedostaju u mjerenjima.

Jedan način na koji možemo postići jednak vremenski razmak je uzimanjem samo onih vrijednosti koje su pokrivene višekratnikom frekvencije uzorkovanja koji ne zahvaća nedostajuće podatke. Kako bi takav postupak zanemario veliku količinu podataka, a nedostajućih podataka je malo (manje od 2 % ukupne duljine nizova), nedostajući podatci su interpolirani.

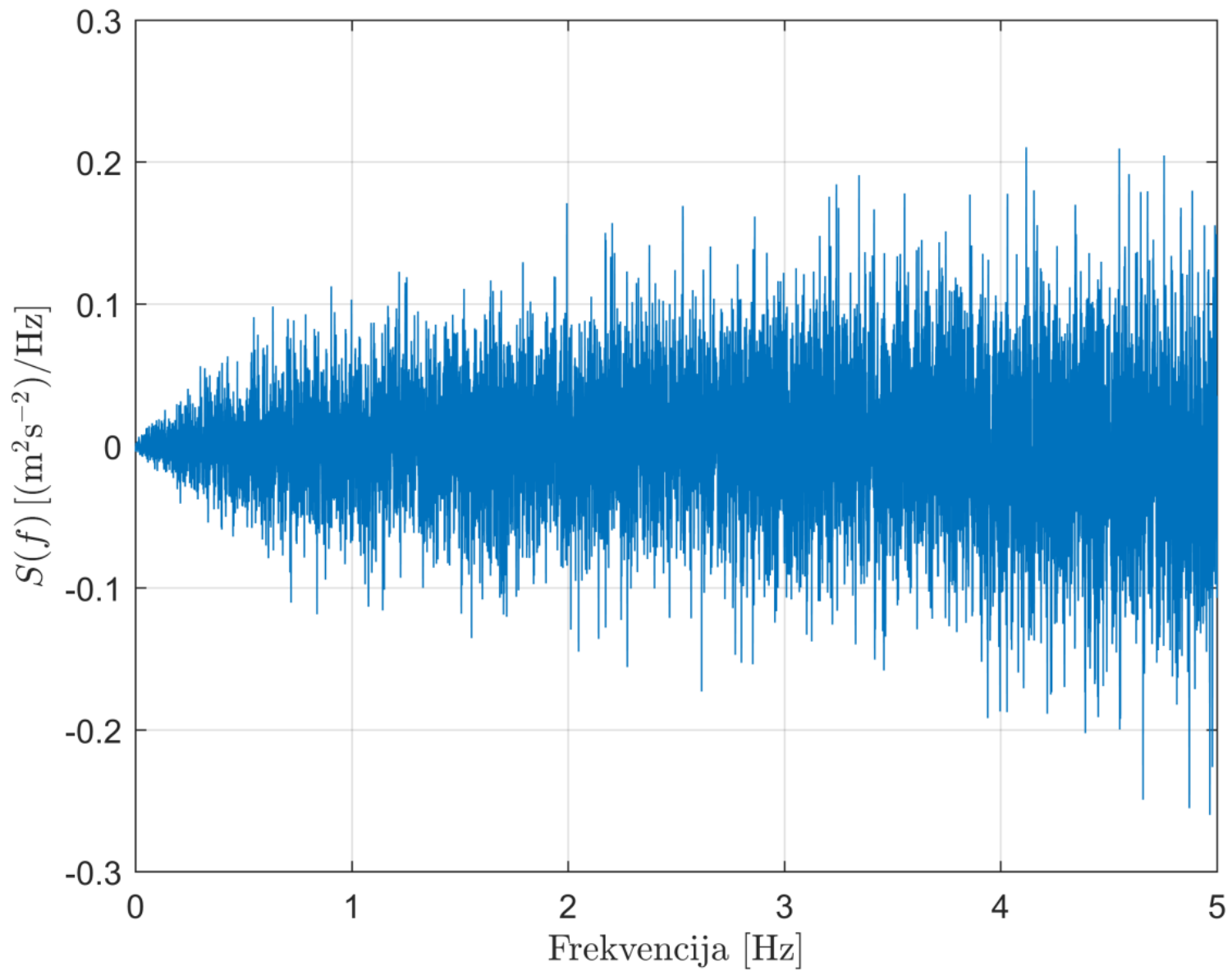
Za interpolaciju, uspoređene su metode interpolacije: najbližim susjedom, linearna, sljedećim susjedom (engl. *next neighbour*), prethodnim susjedom, kubnim Hermiteovim polinomima po dijelovima (PCHIP), i interpolacija splajnovima. U vremenskoj domeni, razlike u metodama interpolacije iznose reda veličine  $0,1 \text{ ms}^{-1}$  (slika 3.2). Budući da spomenute interpolacije koristimo i za procjenu perioda na kojem se nalazi energijski procjep, izračunata je i spektralna gustoća snage (slike 3.3, i 3.4). Uočljivo je da su razlike u spektru reda veličine  $0,1 (\text{m}^2\text{s}^{-2})/\text{Hz}$  što je zanemarivo. Zbog jednostavnosti i učestalosti korištenja (Vickers i Mahrt, 1997), odabrana je linearna interpolacija.



Slika 3.2: Interpolacije nedostajućih podataka na primjeru  $u$  komponente (popis tablica i konstanti) "bure 1a" (tablica 2.1) na 10 m visine. S "real" su označena mjerenja, "lin" označava linearnu interpolaciju, "spl" interpolaciju splajnovima, a "pchip" interpolaciju kubnim Hermiteovim polinomima po dijelovima. Razlike u interpoliranim vrijednostima su reda veličine  $0,1 \text{ ms}^{-1}$ .



Slika 3.3: Spektralna gustoća snage  $u$  komponente "bure 1a" (tablica 2.1) na visini 10 m s vrstama interpolacije kao na slici 3.2. Razlike u spektru između interpolacija su zanemarive (omjer reda veličine razlika i reda veličine spektra je 0,01).

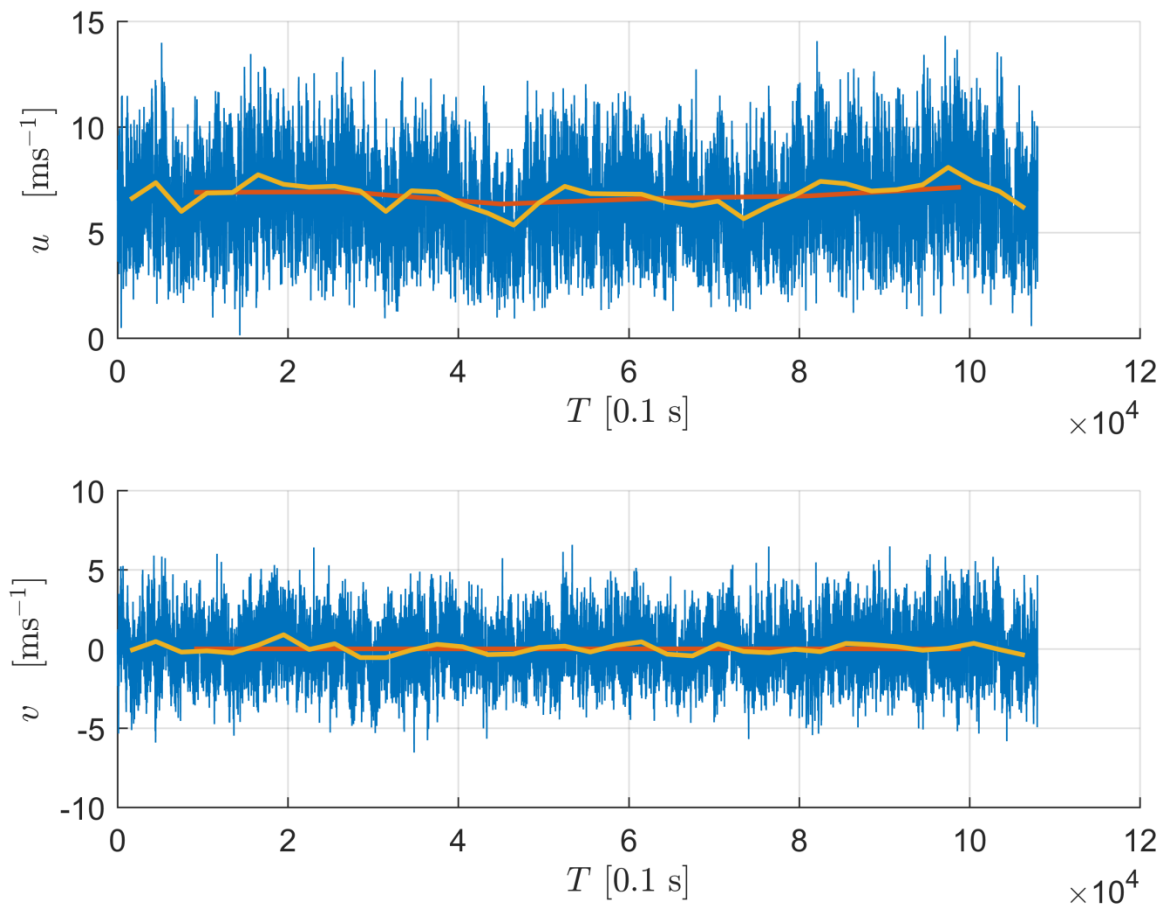


Slika 3.4: Razlika spektralnih gustoća snaga "bure 1a" (tablica 2.1) na visini 10 m dobivene linearnom interpolacijom i interpolacijom splajnovima. Razlika je reda veličine  $0,1 \text{ (m}^2\text{s}^{-2})/\text{Hz}$ . Slični rezultati vrijede za ostale vrste interpolacije i epizode bura.



## 3.2 Rotacija koordinatnog sustava

Horizontalne komponente vjetra su zarotirane u novi koordinatni sustav s osi apcisa usmjerene u smjeru puhanja vjetra i osi ordinata okomito na nju, poštujući desnu orijentaciju sustava. Određivanje smjera je provedeno na 30-minutnim blok intervalima usrednjavanjem smjera brzine vjetra (slika 3.5). Rotacija je provedena radi kasnije primjene Kolmogorovljevog zakona (1.1) vezanog uz račun viskozne disipacije. Interval za rotaciju je odabran na pola sata zbog energijskog procjepa koji potvrđuje da su odabrana gibanja turbulente skale (npr. Kaimal i Finnigan, 1994b).



Slika 3.5: Rotacija horizontalnih komponenta brzine vjetra  $u$  i  $v$  na visini 3 m tijekom epizode "bure 1a" (tablica 2.1). Narančastom linijom je označen 30-minutni srednjak, a žutom 5-minutni. Valja uočiti da je 30-minutni srednjak komponente  $v$  koja je okomita na smjer puhanja vjetra definicijski jednak nuli.

### 3.3 Usporedba s ALADIN modelom

Epizode bure su podijeljene na N i SM tipove koristeći pseudoTEMP-ove i mjerenja anemometra na tornju. Pomoću uvjeta iz Drobac, (2006), bure 3, 7, i 8 su klasificirane kao N tip, bura 10 je izbačena iz rezultata zbog manjka pseudoTEMP-a, a ostale bure su klasificirane kao SM tip. Tako podijeljene, SM bure sadrže 334 30-minutna blok intervala, a N bure 48 30-minutnih blok intervala. Burama su izračunati TKE i udari i uspoređeni s vrijednostima iz ALADIN modela.

#### 3.3.1 Usporedba TKE modela i TKE mjerenja

Kinetička energija turbulencije je izračunata pomoću perturbacija komponenata brzina vjetra kao što je opisano na stranici 11. Te perturbacije komponenata brzina su dobivene uklanjanjem konstante i linearnog trenda na zasebnim 30-minutnim blok intervalima. Uspoređene su vrijednosti TKE iz ALADIN modela i TKE dobivene iz mjerenja (slika 3.6). Prema Keresturiju (2014), odabrana je usporedba s prva četiri nivoa ALADIN-a. Uočljivo je da se mjerenja slažu međusobno kao i nivoi ALADIN modela, ali je povezanost mjerenja i ALADIN modela slaba. Dodatno, ALADIN redovito potcjenjuje TKE iz mjerenja. Isti zaključci se mogu izvesti i za ostale epizode bure u radu.

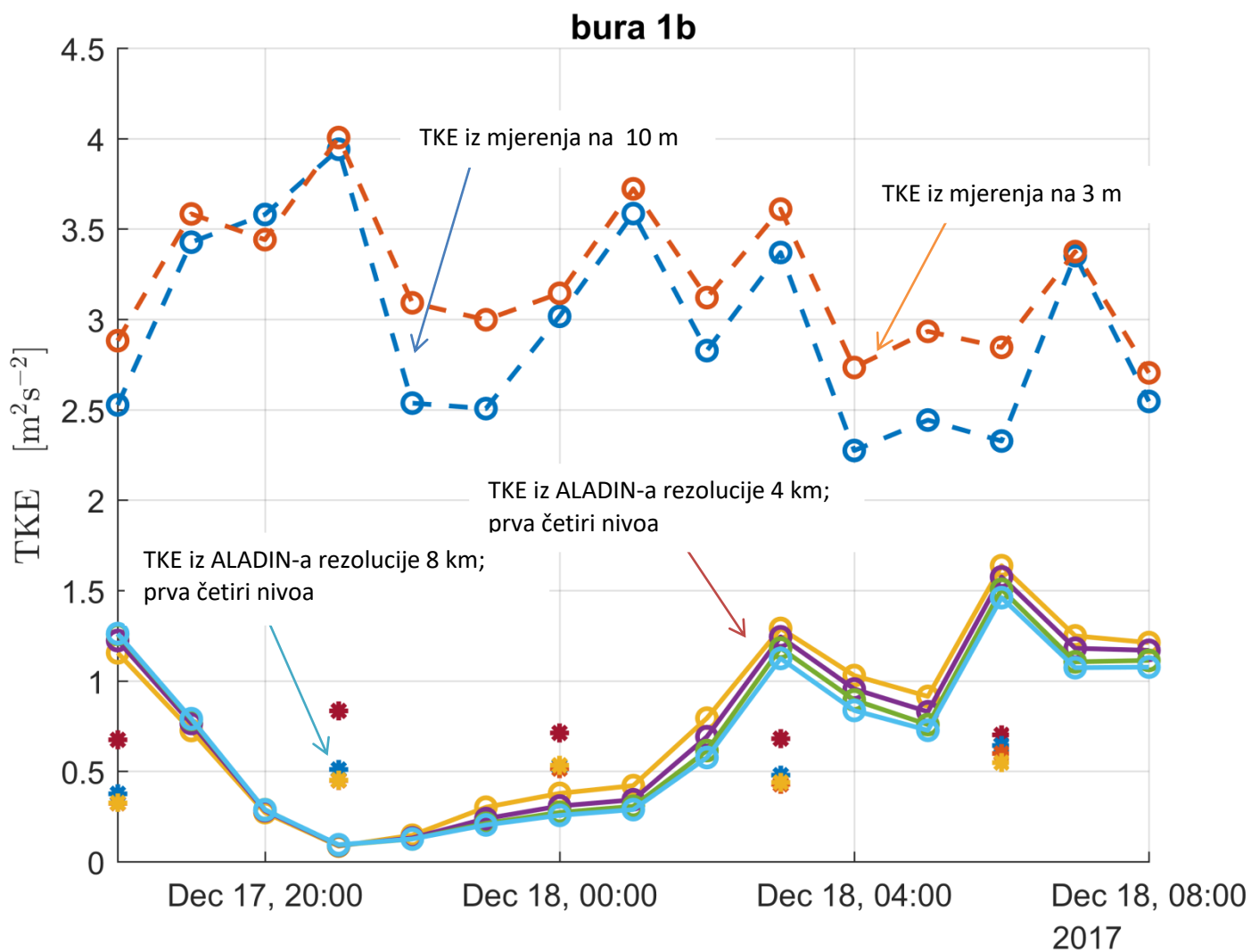
Na slikama 3.7a i 3.7b su dijagrami raspršenja TKE izračunatih iz anemometara s TKE prva četiri nivoa ALADIN-a, podijeljeni po N i SM tipovima. Postignute su slične vrijednosti za oba anemometra po nivoima, kao i među nivoima. Dodatno, dobivaju se slični rezultati za AL4 model kao i za AL8 model, što je očekivano zbog sličnosti njihovih rezultata u vremenskoj domeni.

Zbog vizualno sličnog oblika krivulje koja spaja točke medijana za različite nivoe i anemometre možemo zaključiti da za N tip i SM tip postoje stalni dijagrami raspršenja između izmjerenih TKE i TKE modela. Za prognoziranje stvarne TKE epizode bure modelom, idealno bi očekivali pravac. Alternativno, prognozi možemo pristupiti na sljedeći način: statistički, kad TKE modela pokazuje neku vrijednost, što možemo zaključiti o TKE anemometra?

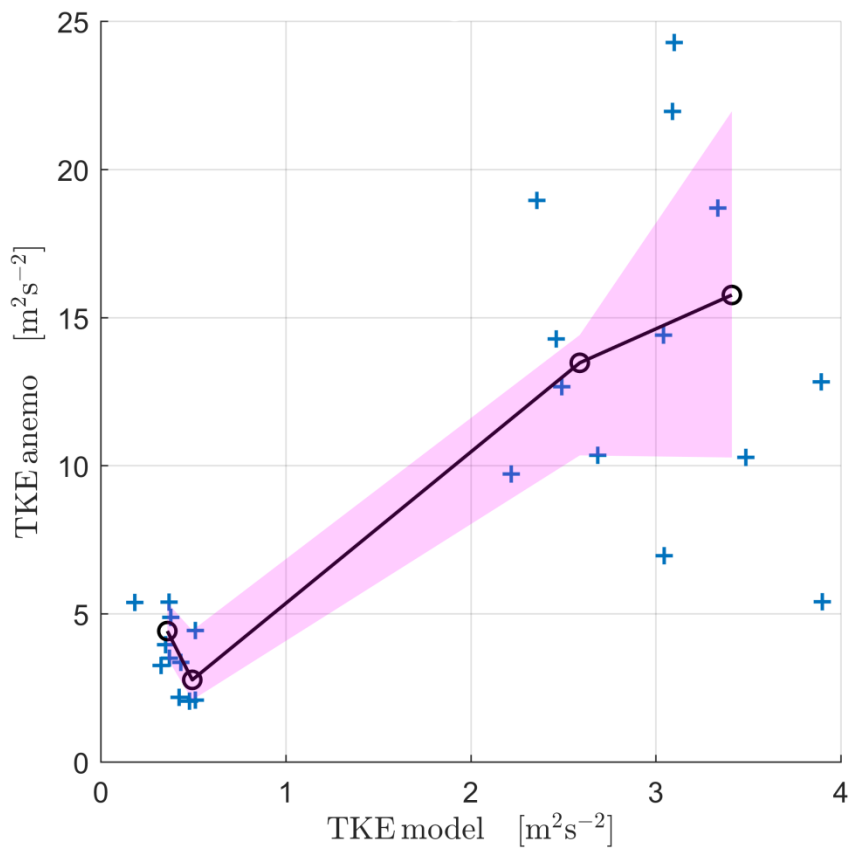
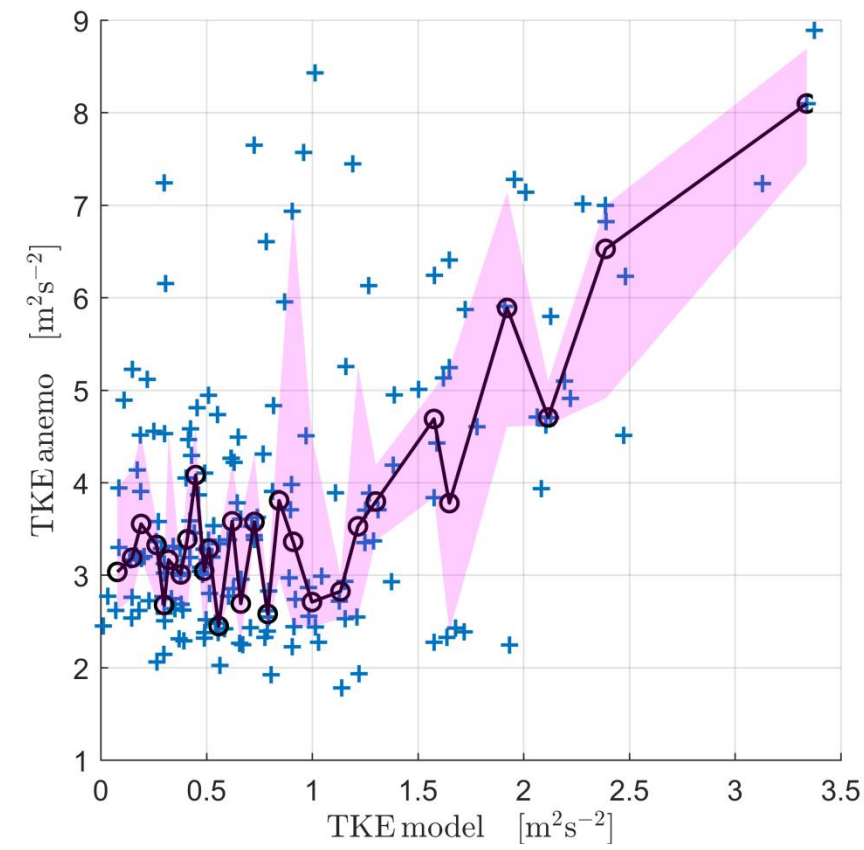
Kod SM tipa bure, s obzirom na veliku varijancu medijana dijagrama raspršenja, raspon TKE izvedene pomoću mjerenja za neki interval TKE dobivene modelom, u praksi je prevelik za

donošenje odluka o slijetanju zrakoplova. Relativno veliki interkvartilni raspon za neke vrijednosti (TKE modela između  $1,5 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$  i  $2 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$  ima interkvartilni raspon preko  $4 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$  za TKE anemometra) također čini takav statistički pristup prognozi otežanim.

Za N tip bure, uzorak na kojem se TKE računa (bure 3, 7, i 8) je premali da se može provesti slično zaključivanje.



Slika 3.6: Usporedba TKE dobivenih iz ALADIN modela i TKE izračunatih ih mjerenja tijekom epizode "bure 1b" (tablica 2.1). Pune linije označavaju TKE-ove prva četiri nivoa ALADIN modela rezolucije 4 km, a zvjezdice TKE-ove prva četiri nivoa ALADIN modela rezolucije 8 km.

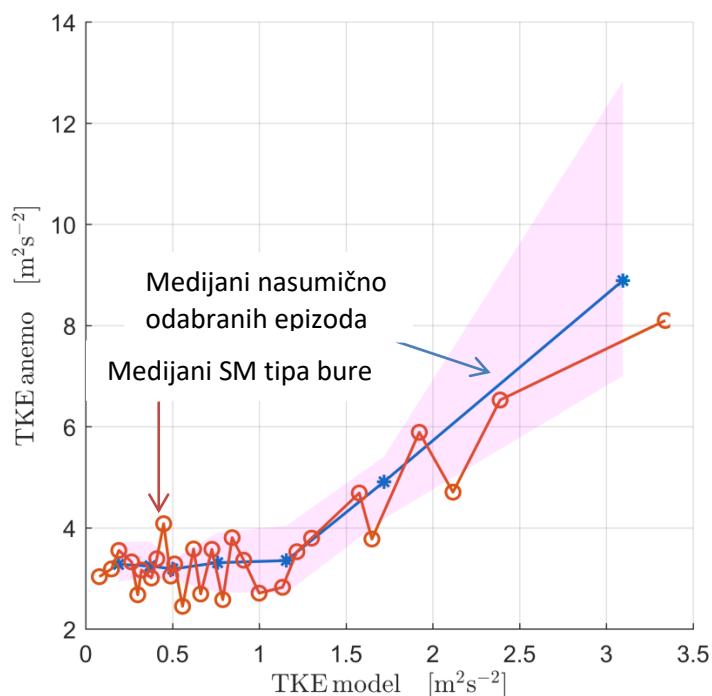


Slika 3.7: Dijagrami raspršenja izračunatih TKE na visini 10 m i TKE prvog nivoa ALADIN modela rezolucije 4 km. Plavim plusevima su označene pojedine TKE, crna linija je medijan, a ružičasta raspon između kvartila. Gornja slika se odnosi na SM tip bure, a donja na N tip.

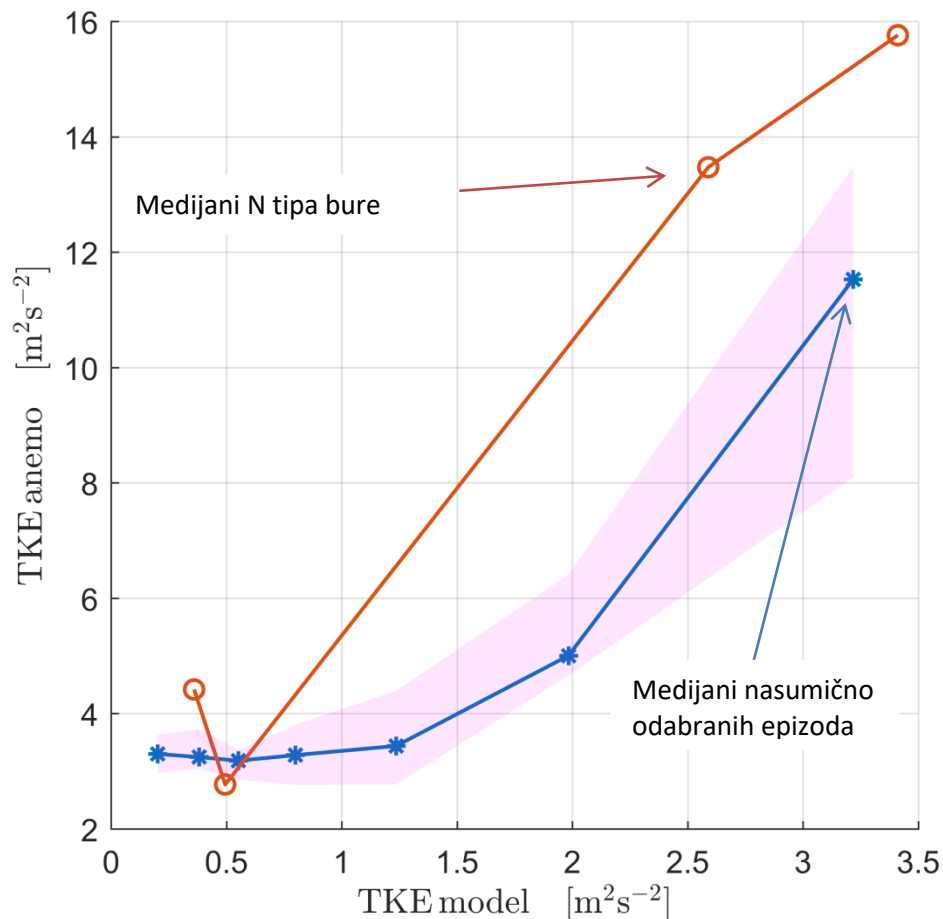
Stalnost subjektivno istih oblika krivulja medijana raspršenja izmjenenog TKE i TKE modela N tipa i SM tipa bure preko prva četiri nivoa i ALADIN modela rezolucija 8 km i 4 km povukla je pitanje radi li se o stvarnom fenomenu očuvanosti oblika krivulje ili je to posljedica varijance uzorkovanja.

Za provjeru, uspoređene su nasumično odabrane epizode bura s N i SM klasama i nacrtani su dijagrami raspršenja (slike 3.8a, 3.8b). Test radi na način da se medijani i kvartili nasumično odabranih bura (SM i N tipa) uspoređuju s medijanom nekog tipa bure (SM ili N tipa). U slučaju da se medijan nekog tipa bure nalazi izvan interkvartilnog raspona nasumično odabranih bura, može se reći da odabrani tip bure je podskup sa statističkim obilježjima različitim od ukupnog skupa bura.

N tip bure odstupa izvan raspona kvartila, dok se SM tip često nalazi unutar njih. Dakle, za N tip bure možemo reći da je fenomenološki dobro odabrana klasa, dok za SM tip, s obzirom na ovaj test, ne možemo išta reći. Rezultat za SM buru je očekivan zbog premalog uzorka koji se ne odnosi na SM tip bure.



Slika 3.8a: Dijagram raspršenja TKE na visini 10 m svih epizoda bura SM tipa i TKE nasumično odabranih 200 uzoraka prvog nivoa modela ALADIN rezolucije 4 km bez ponavljanja. Ružičastom je označen interkvartilni raspon nasumično odabranih epizoda bura.



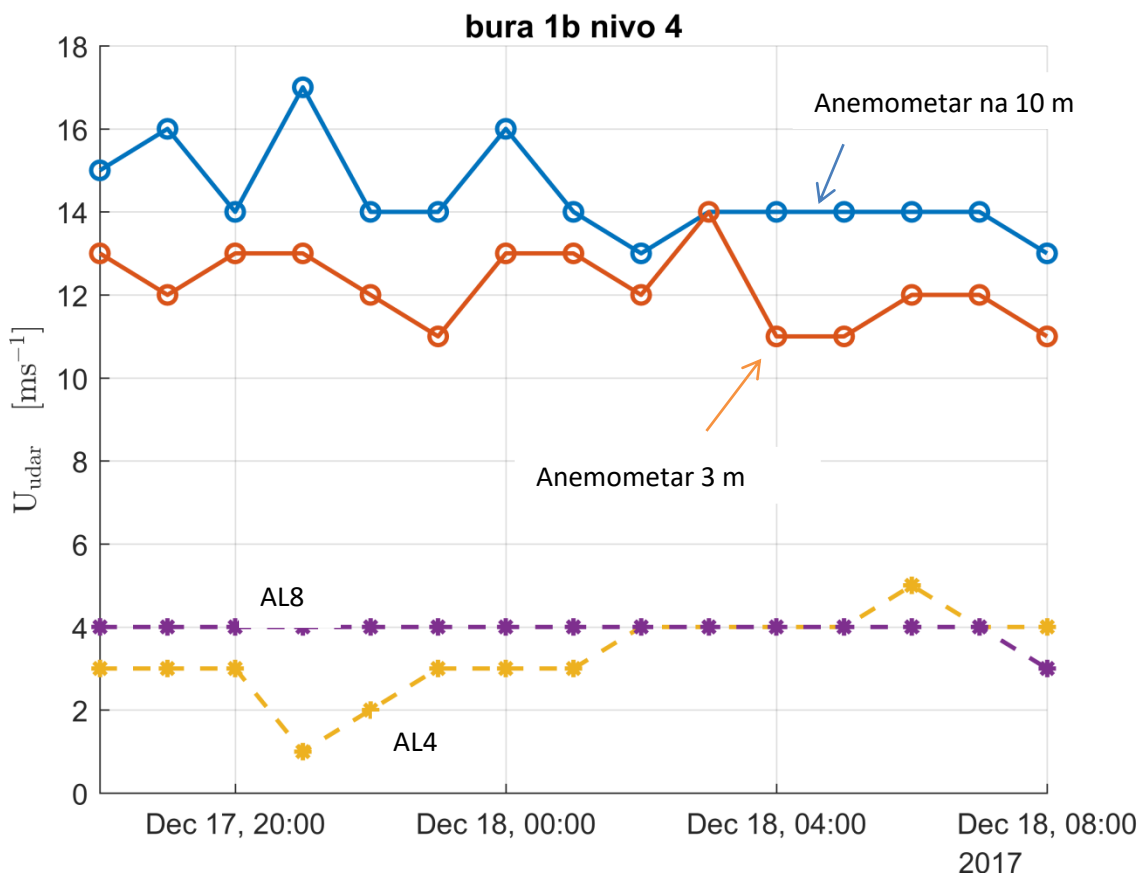
Slika 3.8b: Dijagram raspršenja TKE na visini 10 m svih epizoda bure N tipa i TKE nasumično odabranih 200 uzoraka prvog nivoa modela ALADIN rezolucije 4 km bez ponavljanja. Ružičastom je označen interkvartilni raspon nasumično odabranih epizoda bure.

### 3.3.2 Usporedba horizontalne komponente brzine vjetra modela i udara mjerenja

Na horizontalne komponente vjetra primijenjen je 3-sekundni klizni srednjak. Zatim je izračunat modul horizontalne komponente brzine vjetra. Udari su definirani kao maksimumi takvih podataka na 10-minutnim intervalima (Harper i sur., 2010). Udari su uspoređeni s horizontalnom komponentom brzine vjetra modela ALADIN rezolucija 4 km (AL4) i 8 km (AL8) na prva četiri nivoa u vremenskoj domeni. Budući da korišteni podatci modela imaju rezoluciju

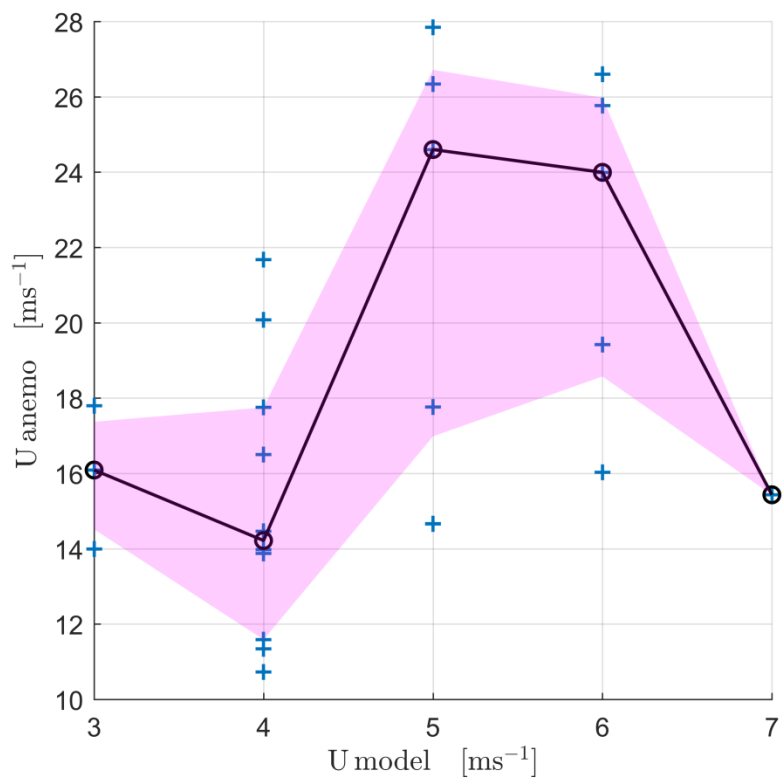
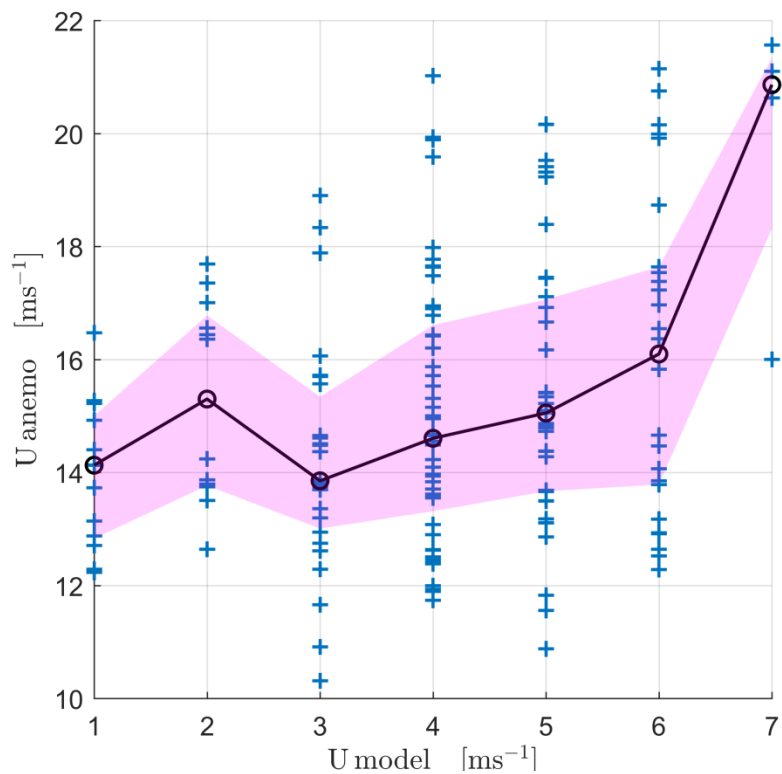
brzine  $1 \text{ ms}^{-1}$ , radi uklanjanja varijacije mjerenja manje od  $1 \text{ ms}^{-1}$ , udari izvedeni iz mjerenja su prethodno zaokruženi na cijele brojeve.

Rezultati se nalaze na slici 3.9. Vizualnom procjenom, modeli se međusobno relativno slažu, i ne procjenjuju dobro varijaciju udara na anemometru. Također se može reći da su vrijednosti modela na slici 3.9 po apsolutnoj vrijednosti puno manje od iznosa udara.



Slika 3.9: Udari izvedeni iz mjerenja i vjetra iz ALADIN modela rezolucije 4 km (AL4), i 8 km (AL8) na nivou 4 tijekom epizode "bure 1b" (tablica 2.1). Modeli loše procjenjuju i potcjenjuju udare izvedene iz mjerenja. Isti zaključci vrijede i za ostale epizode bure.

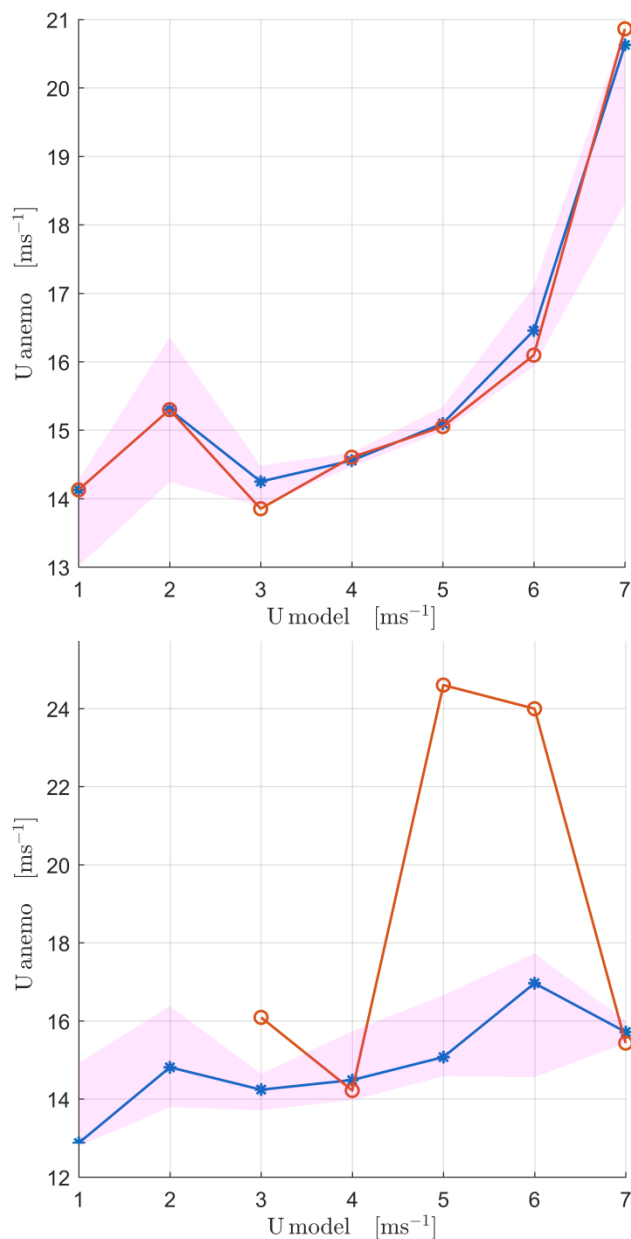
Dijagrami raspršenja (slike 3.10a, 3.10b) pokazuju slično potcjenjivanje udara kao i usporedba udara sa horizontalnom komponentom vjetra ALADIN modela u vremenskoj domeni. Pokušaj pronalaska statističke povezanosti između izmjerenih udara i brzina iz ALADIN modela je otežan zbog velikog interkvartilnog raspona. To znači da za N tip bure možemo reći da je fenomenološki dobro odabrana klasa.



Slika 3.10: Dijagrami rasprišenja izmjerenih udara na visini 10 m i horizontalne komponente vjetra trećeg nivoa ALADIN modela rezolucije 4 km za SM tip bure(gore) i N tip bure (dolje). Plavim plusevima su označene pojedine horizontalne komponente vjetra, crna linija je medijan, a ružičasta raspon između kvartila.



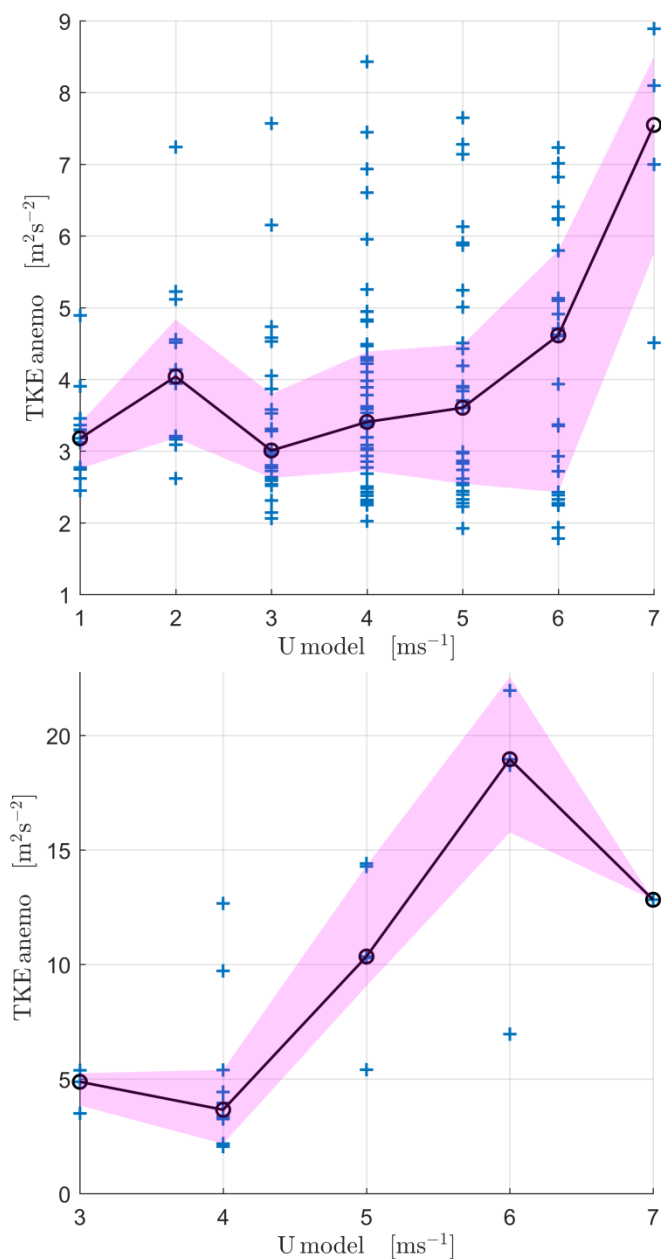
Provjeravanjem varijance uzorkovanja (slike 3.11a, 3.11b) dolazimo do sličnog zaključka kao u potpoglavlju 3.3.1 — za N tip bure možemo reći da rezultati dijagrama raspršenja nisu posljedica varijance uzorkovanja dok za SM tip zbog premale količine ne-SM bura ne možemo reći ništa.



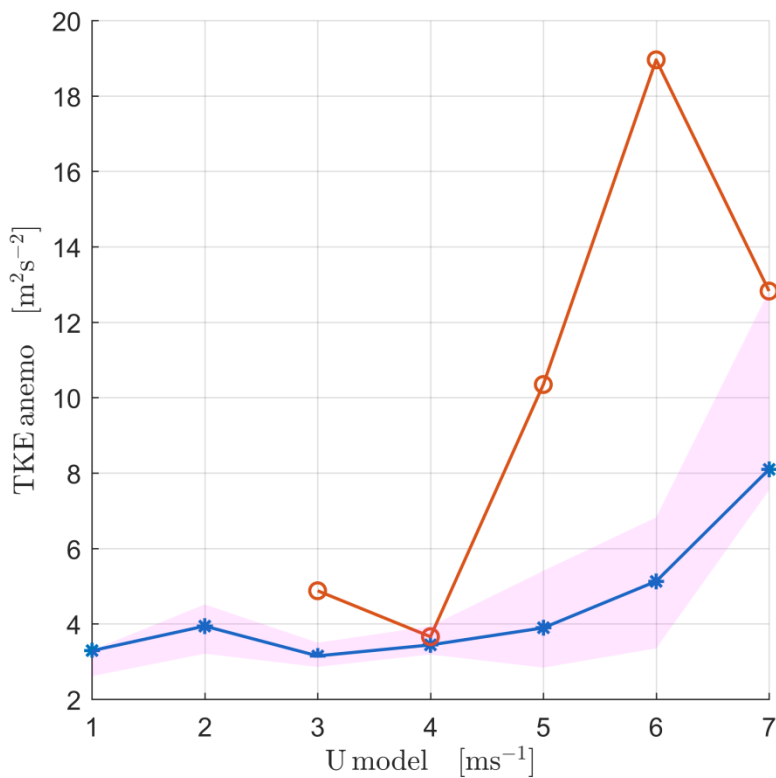
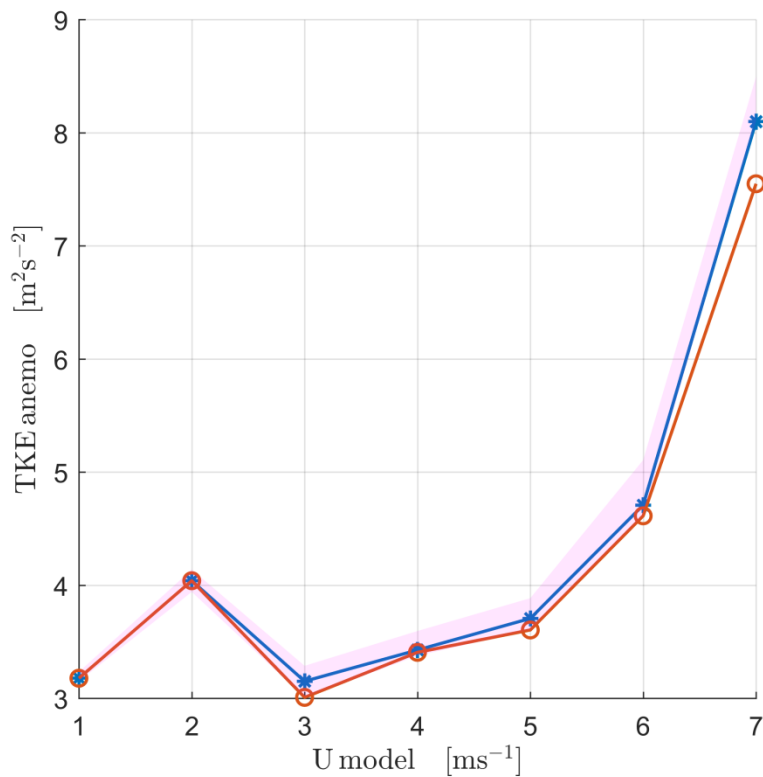
Slika 3.11: Dijagram raspršenja udara na visini 10 m svih epizoda SM bura (gore) i N bura (dolje) s horizontalnom komponentom vjeta trećeg nivoa modela ALADIN rezolucije 4 km. Plavom su označeni medijani 200 uzoraka nasumično odabranih epizoda bura bez ponavljanja (za N tip bure su odabrane tri epizode, a za SM tip 12). Ružičastom su označeni njihovi interkvartilni rasponi.

### 3.3.3 Usporedba TKE mjerenja i horizontalne brzine modela

Pokušana je pronaći statistička povezanost TKE mjerenja i horizontalne brzine modela (slika 3.12a). Ponovno, dovoljno veliki interkvartilni raspon i, u slučaju N tipa bure, premali uzorak, onemogućuju pouzdanu prognozu TKE pomoću ALADIN modela.



Slika 3.12: Dijagrami raspršenja izračunate TKE na visini 10 m SM tipa bure (gore), i N tipa bure (dolje) s horizontalnom komponentom vjetrova trećeg nivoa ALADIN modela rezolucije 4 km. Plavim plusevima su označene pojedine TKE, crna linija je medijan, a ružičasta raspon između kvartila.



Slika 3.13: Dijagram raspršenja TKE na visini 10 m svih epizoda SM bura (gore) i N bura (dolje) s horizontalnom komponentom vjeta trećeg nivoa modela ALADIN rezolucije 4 km. Plavom su označeni medijani 200 uzoraka nasumično odabranih epizoda bura bez ponavljanja (za N tip bure su odabrane tri epizode, a za SM tip 12). Ružičastom su označeni njihovi interkvartilni rasponi.

### 3.4 Račun viskozne disipacije

Komponentama vjetra zarotiranim kao u potpoglavlju 3.2 uklonjena je konstanta i linearni trend na 30-minutnim blok intervalima. Zatim je primijenjena Welchova procjena spektralne gustoće brzine sa nepreklapajućim Hammingovim prozorima duljine 60 s (Piper i Lundquist, 2004). Za kraj, spektar je frekvencijski izglađen s osam točaka po dekadi (kao u 3.1).

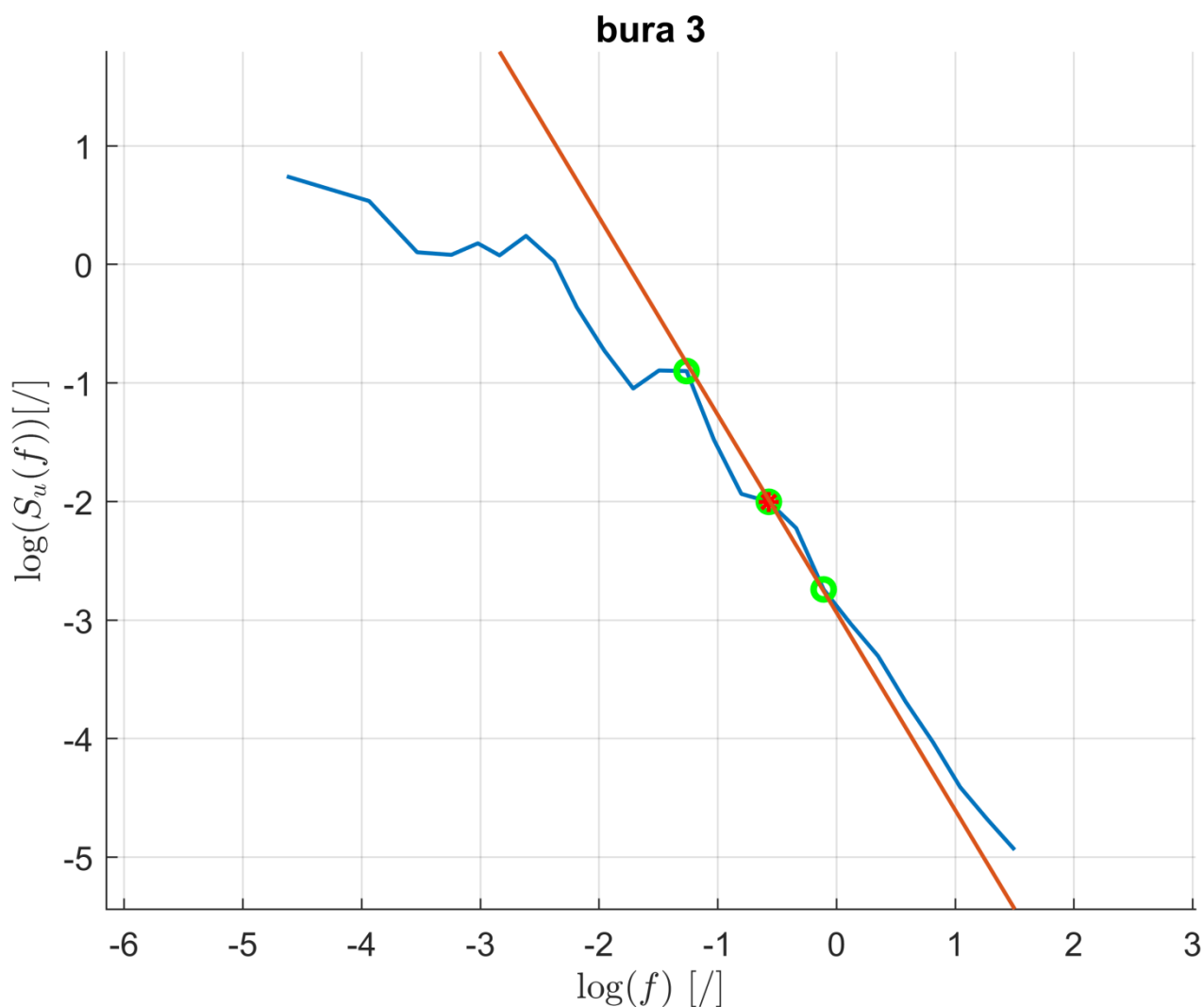
Za odabir područja gdje nagib pravca  $\log-f-\log-S(f)$  odgovara  $-\frac{5}{3}$  dizajnirana je nova metoda. Vizualnom usporedbom nagiba krivulje (slika 3.14) moguće je odbaciti prvih 6 točaka krivulje, tj. pretpostaviti da je logaritam bezdimenzijske frekvencije koju tražimo veći od  $-2,84$ . Na ostale podatke primijenjena je linearna regresija. Da bi neka frekvencija bila proglašena graničnom frekvencijom za koju vrijedi Kolmogorovljev zakon „ $-\frac{5}{3}$ ”, moraju biti ispunjena dva uvjeta:

- odstupanje od pravca nagiba  $-\frac{5}{3}$  koji presijeca ordinatu kao i pravac određen linearnom regresijom, mora biti manje od 0,1.
- odabrana rubna točka mora imati točku koja zadovoljava gornji uvjet kao susjednu ili jednu dalje od susjedne.

U slučaju razlikovanja graničnih frekvencija anemometara za dani period, radi izjednačavanja je uzeta veća granična frekvencija (gdje oba anemometra zadovoljavaju zakon „ $-\frac{5}{3}$ ”).

30-minutni blok intervali u kojima nije zadovoljena Taylorova hipoteza (njih 11 od 786), izbačeni su iz daljnjeg razmatranja.

Gornji postupak je proveden na svakom 30-minutnom blok intervalu. Točke odabrane spomenutim postupkom u potpunosti odgovaraju točkama određenim vizualnom usporedbom na 30-ak primjera.



Slika 3.14:  $\log f$ - $\log S_u(f)$  graf "bure 3" (tablica 2.1) na visini 10 m za polusatno razdoblje od 21:30 h do 22:00 h 19. prosinca 2017. Plavom bojom je označen graf logaritma spektra, crvena linija označava pravac nagiba  $-\frac{5}{3}$ , zeleni krug uvjet udaljenosti od pravca nagiba  $-\frac{5}{3}$ , a crvena zvjezdica označava uvjet vezan uz susjedne točke. Zanimljivo je uočiti da bez zadnjeg uvjeta, odabrana rubna točka bi bila na nižoj frekvenciji.

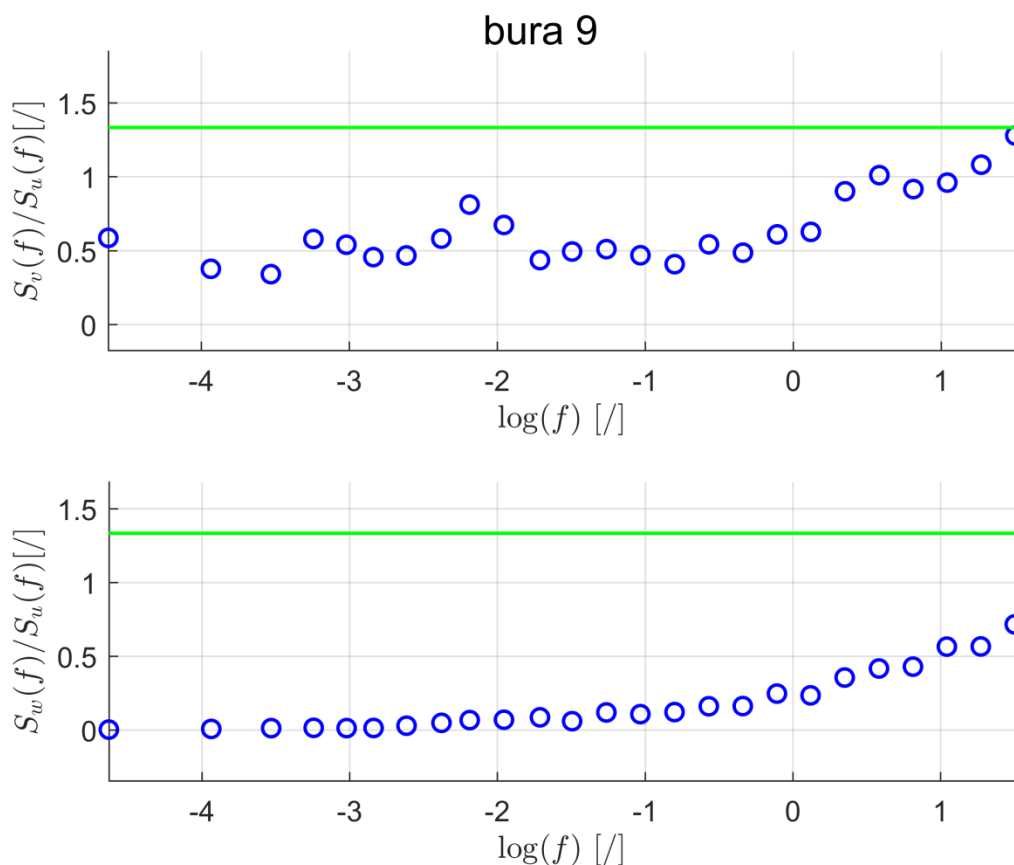
### 3.4.1 Provjere računa viskozne disipacije

#### 3.4.1.1 Lokalna izotropnost

Kolmogorovljev zakon „ $-\frac{5}{3}$ “ vrijedi u inercijskom području. Za provjeru da se spektri komponenta brzina vjetra nalaze u inercijskom području, provjereno je postojanje lokalne izotropnosti preko zakona „ $\frac{4}{3}$ “ (npr. Kaimal i Finnigan, 1994c).

U provedenom računu (slika 3.15), omjer  $\frac{S_w}{S_u}$  nijednom nije postigao  $\frac{4}{3}$ , a omjer  $\frac{S_v}{S_u}$  je postignut u 585 od 786 slučajeva.

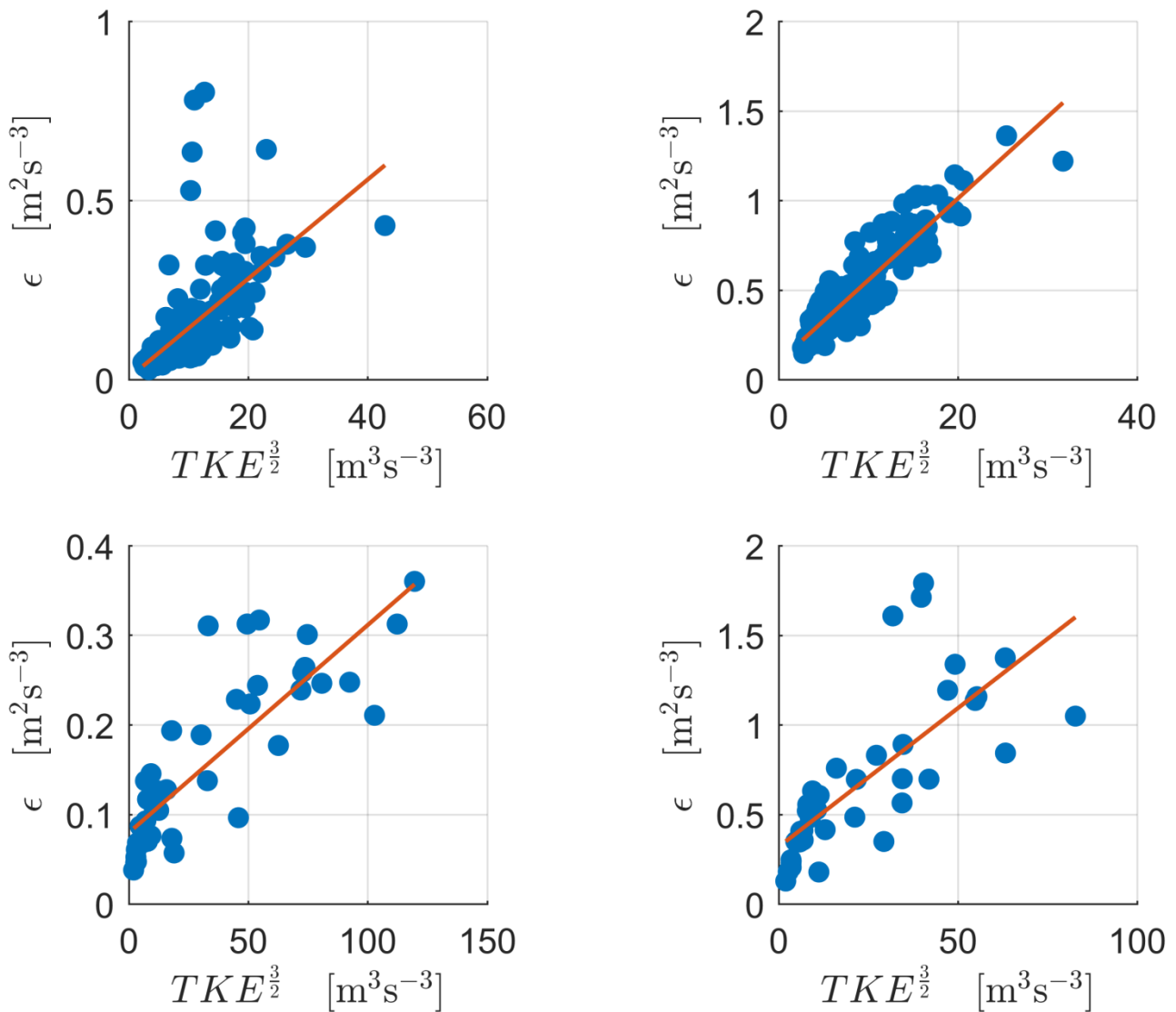
Prema Champagneu, (1978) i Mestayeru, (1982), Kolmogorovljev zakon „ $-\frac{5}{3}$ “ vrijedi i izvan inercijskog područja na što se ovdje oslanjamo.



Slika 3.15: Omjeri spektara  $\frac{S_v}{S_u}$ , i omjeri spektara  $\frac{S_w}{S_u}$  na visini 3 m za razdoblje prvih  $\frac{1}{2}$  h puhanja "bure 9" (tablica 2.1). Zelena linija označava omjer spektara jednak  $\frac{4}{3}$ . Vidimo da ne vrijedi lokalna izotropnost što znači da se spektar vjerojatno ne nalazi u inercijskom području.

### 3.4.1.2 Veza viskozne disipacije i TKE

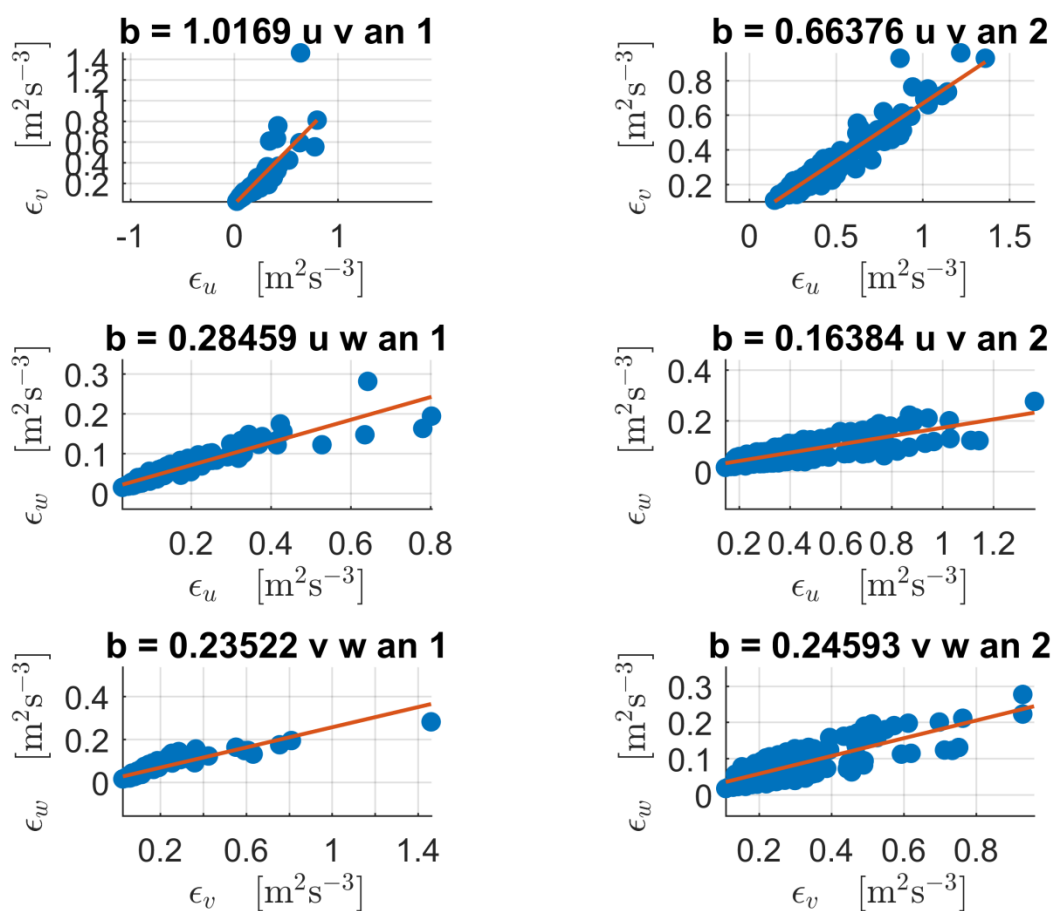
Kao dodatna provjera robusnosti provjerena je veza viskozne disipacije i  $TKE^{\frac{3}{2}}$  (Mellor i Yamada, 1974), (slika 3.16). Subjektivno, veza pokazuje očekivanu linearnu ovisnost, izuzev desetak stršećih vrijednosti (engl. *outliers*) što je dobra potvrda robusnosti računa kako viskozne disipacije  $\epsilon$ , tako i TKE.



Slika 3.16: Dijagrami raspršenja svih  $TKE^{\frac{3}{2}}$  na visini 10 m izvedenih iz mjerenja i pripadnih  $\epsilon$ . Gornje slike se odnose na SM tip bure, a donje na N tip. Očekivana veza je linearna. Pravac linearne regresije označen je narančastom bojom.

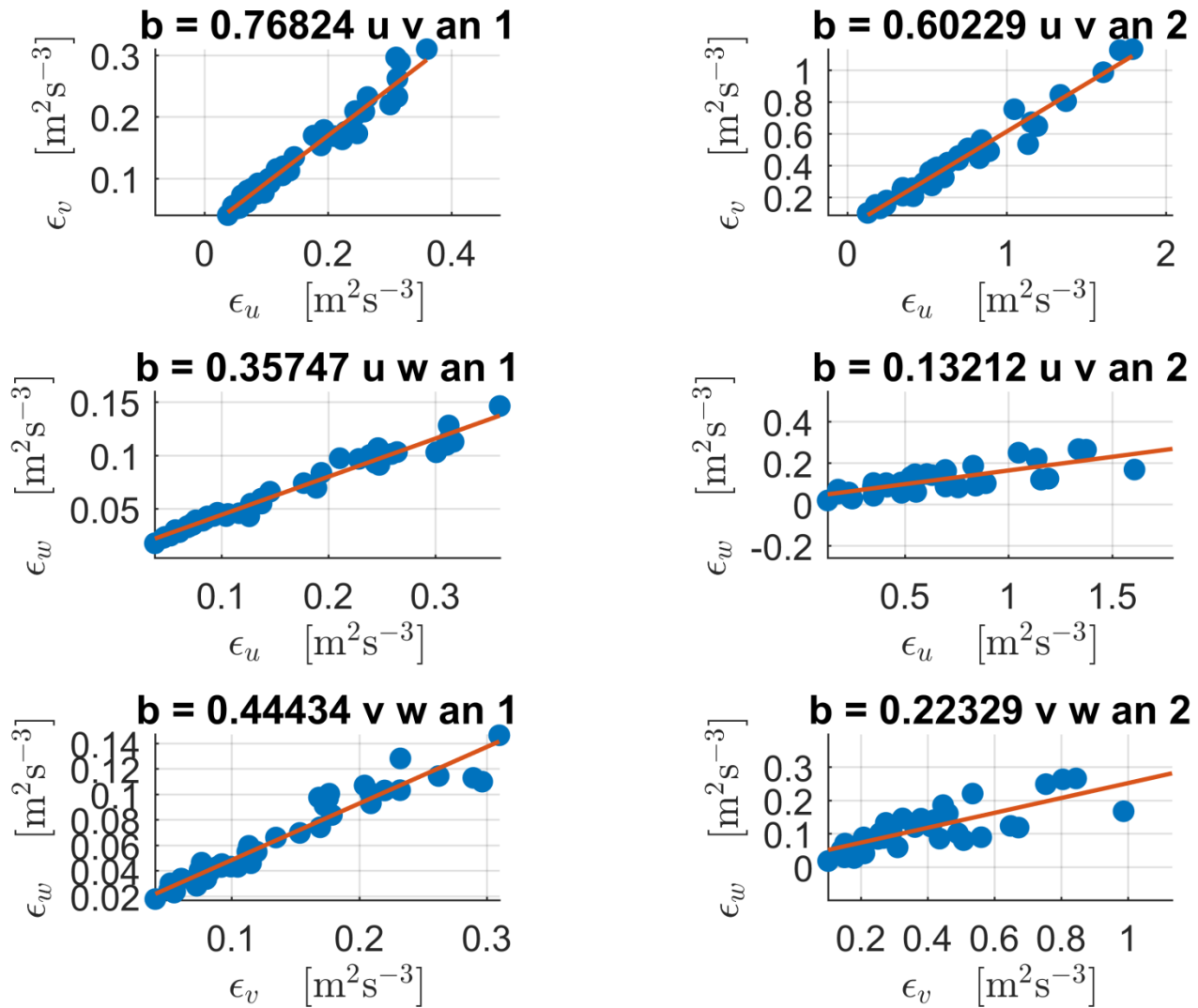
### 3.4.1.3 Viskozna disipacija različitih komponenta brzina vjetra

Istim postupkom kao u potpoglavlju 3.4, viskozna disipacija je izračunata i preko  $v$  i  $w$  komponente. Kolmogorovljeva konstanta je uvećana za koeficijent  $\frac{4}{3}$  (npr. Tennekes i Lumley, 1972). Viskozne disipacije su međusobno uspoređene dijagramima raspršenja po anemometrima (slike 3.17, i 3.18). Disipacije imaju linearnu ovisnost kao što je i očekivano, ali u svim slučajevima osim između  $v$  i  $w$  komponente na visini 10 m (slike 3.17, i 3.18), potcijenjena je vrijednost nagiba pravca.



Slika 3.17: Dijagrami raspršenja  $\epsilon$  SM bure izračunate preko različitih spektara komponenta vjetra. Lijeve slike se odnose na podatke na visini 10 m, a desne na podatke na visini 3 m. Narančastom su označeni pravci linearne regresije. Odstupanje pravca od sjecišta ordinate i apcise je zanemarivo ( $\sim 0,001 \text{ m}^2\text{s}^{-3}$ ). Sa  $b$  su označeni nagibi pravca linearne regresije. Veza  $\epsilon$  izračunate pomoću različitih komponenti je očekivano linearna, ali  $\epsilon_w$  je potcijenjen u odnosu na  $\epsilon_u$ , i  $\epsilon_v$ , kao i  $\epsilon_v$  u odnosu na  $\epsilon_u$ .



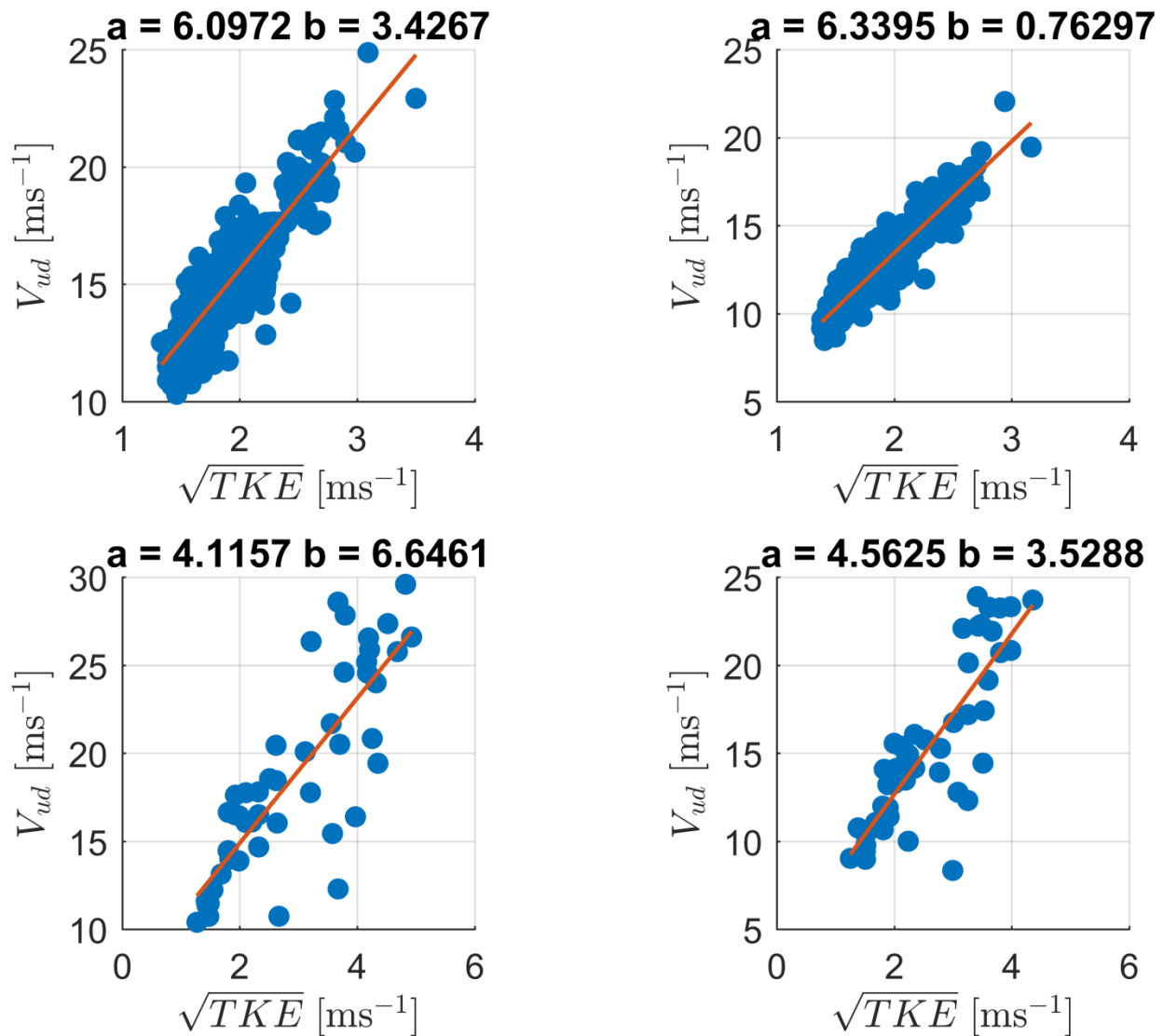


Slika 3.18: Dijagrami raspršenja  $\epsilon$  N bura izračunate preko različitih spektara komponenta vjetera. Lijeve slike se odnose na podatke na visini 10 m, a desne na podatke na visini 3 m. Narančastom su označeni pravci linearne regresije. Odstupanje pravca od sjecišta koordinata i apcise je zanemarivo ( $\sim 0,001 \text{ m}^2\text{s}^{-3}$ ). Sa b su označeni nagibi pravaca linearne regresije. Veza  $\epsilon$  izračunate pomoću različitih komponenti je očekivano linearna, ali  $\epsilon_w$  je potcijenjen u odnosu na  $\epsilon_u$ , i  $\epsilon_v$ , kao i  $\epsilon_v$  u odnosu na  $\epsilon_u$ .

### 3.5 Veza udara s $\sqrt{TKE}$ i $\varepsilon^{\frac{1}{3}}$

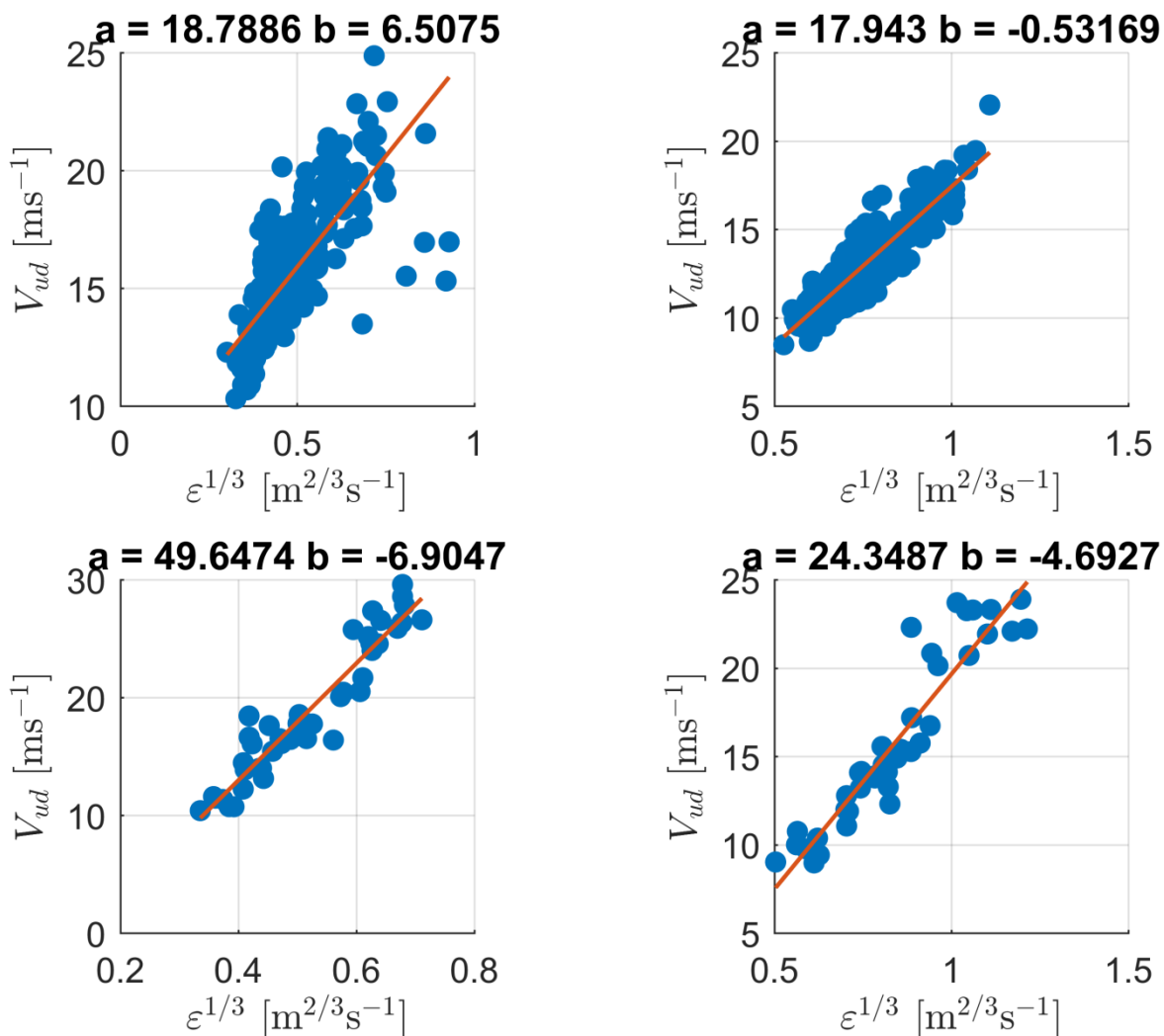
Dimenzionalnom analizom lako se uočava da udari [ $\text{ms}^{-1}$ ] i TKE [ $\text{m}^2\text{s}^{-2}$ ] imaju vezu

$V_{\text{udar}} \sim \sqrt{TKE}$ . Dijagram raspršenja  $V_{\text{udar}}$  i  $\sqrt{TKE}$  se nalazi na slici 3.19. Uočljiv je linearni porast brzine udara sa korijenom viskozne disipacije.



Slika 3.19: Dijagrami raspršenja udara i  $\sqrt{TKE}$  na visini 10 m (lijevo) i 3 m (desno). Gore: SM tip bure, dolje: N tip. Parametar 'b' prikazuje nagib pravca, a parametar 'a' odsječak na osi ordinata.

Za kraj, ispitana je i veza udara vjetra i  $\varepsilon$ . Očekivana veza udara i  $\varepsilon^{\frac{1}{3}}$  slijedi iz dimenzionalne analize i veze  $\varepsilon \sim TKE^{\frac{3}{2}}$ . Dijagram raspršenja pokazuje linearan porast brzine udara i s  $\varepsilon^{\frac{1}{3}}$  (slika 3.20).



Slika 3.20: Dijagrami raspršenja udara vjetra i  $\varepsilon^{\frac{1}{3}}$  na visini 10 m (lijevo) i 3 m (desno). Gore: SM tip bure, dolje: N tip. Parametar 'b' ima dimenziju  $\text{m}^{\frac{1}{3}}$  i prikazuje nagib pravca, a parametar 'a' odsječak na osi ordinata. Uočljiva je linearno rastuća veza varijabli.

Iz slika 3.19 i 3.20, uočljivo je da udari vjetra pokazuju koreliranost s  $\sqrt{TKE}$  i  $\varepsilon^{\frac{1}{3}}$ , što znači da bi se udari vjetra mogli prognozirati pomoću modela koji bi dobro predviđao spomenute veličine.

## 4 Zaključak

Cilj ovog rada bio je pokušati pronaći prikladan parametar za prognozu udara bure na ZLD iz ALADIN modela rezolucije 4 km i 8 km. Znajući da porastom TKE raste i brzina udara, uspoređeni su TKE ALADIN modela na prva četiri nivoa s TKE izmjerenih iz anemometara u vremenskoj domeni i preko dijagrama raspršenja. U oba pristupa pokazalo se da TKE ALADIN-a potcjenjuje izmjerene vrijednosti TKE tijekom epizoda bure i ne simulira izmjerene varijacije adekvatno.

Pokušalo se statistički pristupiti prognozi TKE pomoću TKE ALADIN modela. Problemi takvom pristupu su velika varijanca medijana dijagrama raspršenja (male promjene u TKE modela bile su povezane s velikim promjenama u izmjerenom TKE) i na nekim područjima povećan interkvartilni raspon.

Uočilo se da postoje stalni oblici krivulja dijagrama raspršenja TKE anemometra i TKE modela vezanih uz N tip i SM tip bure za mjerenja na visinama 3 m i 10 m, i za prva četiri nivoa ALADIN-a. Postavilo se pitanje jesu li spomenuti oblici posljedica varijance uzorkovanja, ili su posljedica toga da N tip i SM tip bure imaju svoju fenomenologiju. U tu svrhu proveden je test usporedbom krivulja dijagrama raspršenja TKE anemometra i TKE modela nasumično odabranih bura s krivuljom raspršenja N tipa i SM tipa bure. Za N tip je potvrđeno da oblik krivulje nije posljedica varijance uzorkovanja, dok za SM tip zbog premalog uzorka ne-SM tipa bure nije se moglo ništa zaključiti. To znači da je N tip bure fenomenološki dobro odabrana klasa.

Istom metodologijom pokušalo se povezati udare vjetra s horizontalnom komponentom brzine vjetra ALADIN-a, i pronaći povezanost TKE anemometara (čije povećanje je vezano s povećanjem brzine udara vjetra) sa horizontalnom komponentom brzine vjetra iz ALADIN modela. Zaključci su slični zaključcima prethodnog paragrafa — modelirane varijable je teško povezati s izmjerenima zbog velike varijance medijana i velikog interkvartilnog raspona.

Izračunata je  $\varepsilon$  uz novu metodu odabira rubne frekvencije pri računu za Kolmogorovljev zakon „ $-\frac{5}{3}$ ”. Subjektivno, metoda iznimno uspješno pronalazi rubne frekvencije koje u potpunosti odgovaraju točkama određenim vizualnom provjerom na 30-ak primjera.

Pomoću  $\varepsilon$ , potvrđena je veza  $\varepsilon \sim \text{TKE}^{\frac{3}{2}}$  izmjerenih podataka. Kao dodatna provjera,  $\varepsilon$  je izračunat pomoću ostalih komponenti brzina vjetra. Pokazalo se da je odnos tako izračunatih  $\varepsilon$ -a linearan, ali da se potcjenjuju (ili precjenjuju) na način da  $\varepsilon_w < \varepsilon_v < \varepsilon_u$ .

Za kraj, pokazan je i pozitivna korelacija udara vjetra i  $\sqrt{\text{TKE}}$ , i pozitivna korelacija udara vjetra i  $\varepsilon^{\frac{1}{3}}$ . Iz toga slijedi da udare teorijski možemo procijeniti iz TKE.

Zaključak rada je da udare bure na ZLD možemo procijeniti iz prognozirane TKE, ali trenutni TKE ALADIN modela rezolucije 4 km i 8 km je potrebno reparametrizirati da bi takvo nešto bilo moguće u praksi.

# Bibliografija

- Babić, N. (2013). Proučavanje turbulentnih tokova bure u navjetrini Splita. Diplomski rad. Zagreb: Prirodoslovno-matematički fakultet, 48. str.
- Batchelor, G.K. (1953). The Theory of Homogeneous Turbulence. Cambridge Science Classics. Cambridge University. 197 str.
- Champagne, F. H. (1978). „The fine-scale structure of the turbulent velocity field”. *Journal of Fluid Mechanics* 86, str. 67–108.
- Drobac, M. (2006). „Neke specifičnosti ponašanja bure na području aerodroma Dubrovnik”. *Jadranska Meteorologija* 51, str. 10–24.
- Dyer, A. J. i Bruce H. (1982). „Kolmogoroff constants at the 1976 ITCE”. *Boundary-Layer Meteorology* 22, str. 137–150.
- Frech, M. (2007). „Estimating the turbulent energy dissipation rate in an airport environment”. *Boundary-Layer Meteorology* 123, str. 385–393.
- Harper, B. A i sur. (2010). „Guidelines for converting between various wind averaging periods in tropical cyclone conditions”. *Geneva, Switzerland: WMO*, 54. str.
- Kaimal, J.C. i Finnigan, J.J. (1994a). „Atmospheric Boundary Layer Flows: Their Structure and Measurement”. *Oxford University Press*, str. 269–270.
- (1994b). „Atmospheric Boundary Layer Flows: Their Structure and Measurement”. *Oxford University Press*, str. 38.
- (1994c). „Atmospheric Boundary Layer Flows: Their Structure and Measurement”. *Oxford University Press*, str. 36–37.
- Keresturi, E. (2014). Osobine bure na zračnoj luci Dubrovnik. Diplomski rad. Zagreb: Prirodoslovno-matematički fakultet, 52. str.
- Lepri, P. i sur. (2017). „Bora wind characteristics for engineering applications”. *Wind and structures* 24.6, str. 579–611.
- Makjanić, B. (1978). Bura, jugo, etezija, *Prilozi poznavanju vremena i klime SFRJ* 5, str. 1-43.

Mellor, G. L. i Tetsuji, Y. (1974). „A Hierarchy of Turbulence Closure Models for Planetary Boundary Layers”. *Journal of the Atmospheric Sciences* 31.7, str. 1791–1806.

Mestayer, P. (1982). „Local isotropy and anisotropy in a high-Reynolds number turbulent boundary layer”. *Journal of Fluid Mechanics* 125, str. 475–503.

Oncley, S. P. i sur. (1996). „Surface-Layer Fluxes, Profiles, and Turbulence Measurements over Uniform Terrain under Near-Neutral Conditions”. *Journal of the Atmospheric Sciences* 53.7.

Piper, M. i Lundquist, J.K. (2004). „Surface Layer Turbulence Measurements during a Frontal Passage”. *Journal of the Atmospheric Sciences* 61.14, str. 1768–1780.

Smith, R. B. (1987). „Aerial Observations of the Yugoslavian Bora”. *Journal of the Atmospheric Sciences* 44.2, str. 269–297.

Stull, R. B. (1988a). „An Introduction to Boundary Layer Meteorology”. *Springer Netherlands*, 13, str. 151.

— (1988b). „An Introduction to Boundary Layer Meteorology”. *Springer Netherlands*, str. 18.

— (1988c). „An Introduction to Boundary Layer Meteorology”. *Springer Netherlands*, str. 32.

Tennekes, H. i Lumley, J.L. (1972). *A First Course in Turbulence*. *MIT Press*, 300 str.

Vickers, Dean i Mahrt, L. (1997). „Quality Control and Flux Sampling Problems for Tower and Aircraft Data”. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 14.3, str. 512–526.

Williams, R. T. (1974). „Numerical Simulation of Steady-State Fronts”. *Journal of the Atmospheric Sciences* 31.5, str. 1286–1296.

WindMaster and WindMaster Pro User Manual (2017). English. *Gill Instruments*, 69. str.

Yoshino, M. M., 1976: Local wind bora. *University of Tokyo Press, Tokyo*, 289 str.