

# Procjena triplet kovarijanci turbulencije za buru

---

Malečić, Barbara

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:217:537269>

Rights / Prava: [In copyright](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2021-02-08**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
GEOFIZIČKI ODSJEK

Barbara Malečić

PROCJENA TRIPLET KOVARIJANCI  
TURBULENCIJE ZA BURU

Diplomski rad

Zagreb, 2019

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
GEOFIZIČKI ODSJEK

SMJER: METEOROLOGIJA I FIZIČKA OCEANOLOGRAFIJA

**Barbara Malečić**

Diplomski rad

# **Procjena triplet kovarijanci turbulencije za buru**

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

Ocjena diplomskog rada: \_\_\_\_\_

Povjerenstvo: 1. \_\_\_\_\_

2. \_\_\_\_\_

3. \_\_\_\_\_

Datum polaganja: \_\_\_\_\_

Zagreb, 2019.

*Prije svega zahvaljujem doc. dr. sc. Željku Večenaju na prihvaćanju mentorstva. Hvala Vam na vodstvu i nesebičnoj pomoći koju ste mi ukazali tijekom izrade ovog rada. Hvala što ste uvijek našli vremena za moja pitanja i nedoumice. Bez Vaših stručnih savjeta, prijedloga i velikog truda ovaj rad ne bi bio izvediv.*

*Posebno zahvaljujem prof. dr. sc. Branku Grisogonu na prijedlogu teme i pruženoj prilici. Hvala za sve savjete, ideje, opaske i najvažnije, za svu pruženu podršku.*

*Zahvaljujem osoblju Geofizčkog odsjeka na prenesenom znanju. Također, hvala svim kolegama na nesebičnoj kolegijalnosti, svim dubokoumnim raspravama i svoj zabavi. Vaša prisutnost svakako je uljepšala moje studentske dane.*

*Veliko hvala mojoj obitelji na neizmjerne podršci, razumijevanju i strpljenju. Hvala Vam što ste me uvijek ohrabivali i vjerovali u mene i moj uspjeh, čak i onda kad ni ja sama nisam.*

*Zahvaljujem se svim prijateljicama i prijateljima koji su uvijek bili uz mene i bez kojih cijeli tok studiranja ne bi prošao tako lako i zabavno. Hvala na svim domskim druženjima, svim satima provedenim u „slasti” i opskurnoj količini una.*

*Hvala ti S., što si uvijek bio uz mene.*

## Sažetak

Bura je jak, relativno hladan i mahovit vjetar koji najčešće puše iz sjeveroistočnog kvadranta na istočnoj obali Jadranskog mora. U ovom radu analizirane su, po prvi puta, triplet kovarijance turbulencije bure.

Korišteni podaci su s mjernog tornja na Pometenom brdu u zaleđu Splita. Od travnja 2010. do lipnja 2011. godine mjerene su tri komponente brzine vjetra te sonična temperatura. Mjerenja su vršena na tri visine, 10, 22 i 40 m, frekvencijom uzorkovanja od 5 Hz. Tijekom promatranog razdoblja izdvojeno je 60 epizoda bure.

Glavni cilj ovog rada je analiza članova prognostičke jednadžbe za varijance turbulencije. Pritom je određena viskozna disipacija na dva načina: (i) standardnom inercijskom metodom ( $\varepsilon_{IDM}$ ), i po prvi put (ii) izravnom metodom iz prognostičkih jednadžbi za varijance tubulencije ( $\varepsilon_{EQ}$ ). Izravna metoda pokazala se uspješnom u smislu da može reproducirati oblik krivulje viskozne disipacije, ali su vrijednosti dobijene izravnom metodom za nekoliko redova veličine manje. Nadalje, dobijena je linearna veza između  $\varepsilon_{IDM}$  i  $\varepsilon_{EQ}$ . Uz pomoć rezultata dobijenih izravnom metodom procijenjena je viskozna disipacija u longitudinalnom, transverzalnom i vertikalnom smjeru strujanja. Pokazalo se da viskozna disipacija najveći utjecaj ima upravo u longitudinalnom smjeru puhanja bure.

Glavni fokus ovog rada je na članu turbulentnog transporta koji sadrži triplet kovarijancu. Utvrđeno je da je turbulentni transport značajan po intenzitetu za buru. On može poprimiti i pozitivne i negativne vrijednosti. Na višim nivoima on je najčešće negativan, dok je na nižim pozitivan. Odnosno, turbulentni transport na višim nivoima najčešće odvodi turbulentnu varijancu te je dovodi na niže nivoe. To je ujedno i jedan od glavnih zaključaka ovog rada i doprinosi spoznaji zašto je bura tako poseban, svjetski poznat vjetar.

**Ključne riječi:** triplet kovarijanca turbulencije, bura, turbulentni transport, viskozna disipacija

# Evaluation of turbulent triplet covariances for bora flows

## Abstract

Bora is a strong, relatively cold, gusty wind that usually blows from the northeastern quadrant on the east coast of the Adriatic Sea. In this study turbulence triplet covariances were analyzed, for the first time, for bora flows.

The measurements used were obtained from the measuring tower on Pometeno brdo, in the hinterland of Split, Croatia. From April 2010 until June 2011 three components of wind speed and sonic temperature were measured. The measurements were performed on three heights, 10, 22 and 40 m above the ground with the sampling frequency of 5 Hz. During the observed period, total of 60 bora episodes were isolated.

The main objective of this study is to analyze terms in prognostic equations for turbulence variances. In that respect the viscous dissipation term was calculated using two methods: (i) inertial dissipation method ( $\varepsilon_{IDM}$ ), and for the first time (ii) direct by the prognostic equations for variances of turbulence ( $\varepsilon_{EQ}$ ). It has been determined that direct method can successfully reproduce the shape of the curve, but the values were for several orders of magnitudes smaller. Further, linear relationship between  $\varepsilon_{IDM}$  and  $\varepsilon_{EQ}$  was obtained. Using the results for  $\varepsilon_{EQ}$  viscous dissipation in longitudinal, transversal and vertical direction was determined. It has been shown that viscous dissipation has the greatest impact in bora's longitudinal direction.

The main focus is on the turbulent transport term, in other words, the triplet covariance term. It has been found that turbulent transport is significant for intensity for bora flows. Furthermore, turbulent transport can be both positive and negative. It is mostly negative at the upper levels and positive at the lower levels. Therefore, turbulent transport, in most cases, takes away turbulent variance from the upper levels and brings it down to the lower ones. This is one of the main findings of this study; it adds to the understanding of peculiarities of bora wind.

**Keywords:** turbulence triplet covariance, bora, turbulent transport, viscous dissipation

# Sadržaj

<b>1</b>	<b>Uvod.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Teorijski pregled .....</b>	<b>4</b>
2.1	<i>Definicije turbulencije.....</i>	4
2.2	<i>Reynoldsova dekompozicija .....</i>	5
2.3	<i>Skala usrednjavanja .....</i>	6
2.4	<i>Prognostičke jednadžbe za varijance.....</i>	7
2.5	<i>Viskozna disipacija.....</i>	9
2.6	<i>Parametrizacija viskozne disipacije.....</i>	11
<b>3</b>	<b>Podaci .....</b>	<b>12</b>
3.1	<i>Lokacija mjernog tornja.....</i>	12
3.2	<i>Kontrola kvalitete podataka.....</i>	14
3.3	<i>Definicija epizoda bure .....</i>	16
<b>4</b>	<b>Rezultati .....</b>	<b>21</b>
4.1	<i>Određivanje vremenske skale usrednjavanja .....</i>	21
4.2	<i>Turbulentne perturbacije .....</i>	23
4.3	<i>Proračun viskozne disipacije .....</i>	23
4.4	<i>Veza između dvije metode određivanja viskozne disipacije.....</i>	25
4.5	<i>TKE i viskozna disipacija.....</i>	29
4.6	<i>Vremenski nizovi članova prognostičkih jednadžbi za varijance.....</i>	32
4.7	<i>Odnos turbulentnog transporta i mehaničke produkcije.....</i>	34
<b>5</b>	<b>Zaključak .....</b>	<b>40</b>
	<b>Literatura.....</b>	<b>42</b>

# 1 Uvod

U ovom radu proučavat će se obilježja turbulencije bure - jakog, relativno hladnog i mahovitog vjetra koji najčešće puše iz sjeveroistočnog kvadranta na istočnoj obali Jadranskog mora. Bura nastaje obrušavanjem relativno hladne sjevernoistočne struje preko Dinarida, planinske prepreke okomite na tok strujanja (npr. Jurčec, 1981; Smith 1987; Klemp i Durran, 1987) što generira strme planinske valove pa su karakteristike stujanja pod velikim utjecanjem kompleksne orografije terena. Najveće brzine dostižu se na mjestima gdje je smjer strujanja pretežno okomit na planinski lanac te u području prijevoja zbog kanaliziranja (npr. Večenaj, 2012).

Prelazak zraka preko prepreke kod jake bure odvija se najčešće u hidrauličkom režimu strujanja koje završava hidrauličkim skokom. Hidraulički režim omogućuje ubrzanje vjetra i na uzlaznoj i na silaznoj strani, čime se nadolazećem toku zraka znatno povećava brzina (npr. Smith, 1987; Bajić, 1991; Gohm i sur., 2008; Grisogono i Belušić, 2009a). Bura u pravilu postiže široki spektar srednjih brzina vjetra, ali zbog karakteristične mahovitosti, maksimum brzine može prijeći i  $60 \text{ m s}^{-1}$  (npr. Belušić i Klaić, 2006; Grisogono i Belušić, 2009a).

Dosad su mezoskalne karakteristike bure intenzivno istraživane (npr. Klemp i Durran, 1987; Enger i Grisogono, 1998; Klaić i sur., 2003; Grubišić, 2004; Jiang i Doyle, 2005; Belušić i sur., 2007; Gohm i sur., 2008; Horvath i sur., 2009), dok mikroskalne karakteristike nisu još sasvim istražene. Razlog tome je nedostatak visokofrekventnih mjerenja brzine vjetra i temperature u prostoru i vremenu. Ovakva mjerenja nužna su za analizu mikroskalnih karakteristika strujanja. Dosad je provedeno nekoliko projekata u sklopu kojih su vršena takva mjerenja prvenstveno na istočnoj jadranskoj obali. U ovom radu koristit će se podaci dobijeni u okviru BORA<sup>1</sup> i WINDEX<sup>2</sup> (*Wind resources and forecasting in complex terrain of Croatia*) projekata.

---

<sup>1</sup> [www.pmf.unizg.hr/geof/znanost/meteorologija](http://www.pmf.unizg.hr/geof/znanost/meteorologija)

<sup>2</sup> [www.windex.hr](http://www.windex.hr)



U okviru tih projekata skupljeni su podaci s meteorološkog tornja na Pometenom brdu u zaleđu Splita u razdoblju od travnja 2010. do lipnja 2011. godine. Analiza ovih podataka provedena je u nekoliko radova koji se baziraju na proučavanju mikroskalnih obilježja bure.

Lepri i sur. (2014) proučavaju prizemne profile brzine bure u razdoblju od travnja 2010. do lipnja 2011. godine. Glavni cilj analize je ispitati slaganje prizemnih profila dominantnog smjera vjetra s logaritamskim i potencijskim zakonom. Po prvi puta pokazano je dobro slaganje profila dominantnog smjera bure s logaritamskim i potencijskim zakonom. Nadalje, uočeno je da se povećanjem brzine vjetra smanjuje eksponent u potencijskom zakonu i aerodinamička prizemna duljina hrapavosti, dok brzina trenja pritom poprima veće vrijednosti. Stoga, manjim brzinama vjetra odgovara urbani vertikalni profil vjetra, a većim ruralni.

Nastavak istraživanja slijedi kada Lepri i sur. (2015) proučavaju intenzitet prizemne turbulencije, Reynoldsovu napetost te skale duljine turbulencije na jednoj ljetnoj epizodi bure u trajanju od 24. srpnja do 27. srpnja 2010. godine. Po prvi je puta određena Reynoldsova napetost kod bure direktno iz podataka. Uočeno je da intenzitet prizemne turbulencije i Reynoldsove napetosti nisu ovisni o srednjoj brzini vjetra. Nadalje, uočeno je da duljine skale turbulencije prate trend promjena srednje brzine vjetra. Utvrđeno je da se, s povećanjem visine, intenzitet turbulencije i Reynoldsove napetosti smanjuju, a duljine skale turbulencije se povećavaju.

Babić i sur. (2016) izolirali su 17 epizoda zimskih bura u razdoblju od 1. siječnja do 31. ožujka 2011. godine u svrhu proučavanja vertikalnih turbulentnih tokova impulsa i topline. Spektralnom analizom i metodom ogiva utvrđena je prikladna vremenska skala usrednjavanja od 15 min. Utvrđeno je očekivano ponašanje turbulentnih tokova do srednjih horizontalnih brzina od  $12 \text{ m s}^{-1}$ . Međutim, za horizontalne brzine veće od navedene uočeno je neočekivano ponašanje. Naime, noćni tok topline na nivou od 10 m pokazao se pozitivnim, umjesto negativnim. Nadalje, vertikalni tokovi impulsa veći su na nivou od 22 m, nego oni na 10 m i 40 m. Ovi vertikalni tokovi impulsa pokazali su iznimnu ovisnost o smjeru vjetra s beznačajnim vertikalnim transportom impulsa za

najveće srednje brzine. Po prvi put su analizirane koherentne strukture VITA (*variable-interval time averaging*) metodom.

Ovaj rad nastavit će proučavanje turbulentnih obilježja bure na Pometenom brdu, točnije proučavat će se turbulentni momenti trećeg reda (triplet kovarijance turbulencije). Glavna motivacija za ovaj rad su značajne divergencije turbulentnih tokova (turbulentni momenti drugog reda) pokazane u Babić i sur. (2016). U ovom radu po prvi puta će biti određene triplet kovarijance za buru; preliminarni rezultati prikazani su u Malečić i sur. (2018). Očekuje se da će navedena analiza dati uvid u procese koji se događaju u režimu turbulencije bure. Sam koncept ovog rada je sljedeći: u poglavlju 2 izložen je kratki teorijski pregled, u poglavlju 3 dani su detalji o korištenim podacima, rezultati su prikazani u poglavlju 4, a generalni zaključci dani su u poglavlju 5.

## 2 Teorijski pregled

### 2.1 Definicije turbulencije

Turbulentno strujanje podrazumijeva pojačano miješanje u fluidu. Kod turbulentnog strujanja dominantne su slučajne komponente te njihova nestacionarna višeskalna interaktivna gibanja (npr. Grisogono i Belušić, 2009b). Dakle, u takvom strujanju postoji međudjelovanje različitih prostorno-vremenskih skala gibanja.

Razumijevanje turbulentnog strujanja fluida još i danas predstavlja veliki izazov unutar klasične i kvantne fizike. Naime, procesi nastanka turbulencije još nisu u potpunosti razjašnjeni, a samo strujanje nemoguće je prognozirati s dovoljnom pouzdanošću.

Upravo iz navedenih razloga, vrlo je teško dati dobru definiciju turbulencije; možemo ju samo opisivati. Jedan od poznatijih opisa turbulencije svakako je onaj Richardsonov iz 1922. godine:

*„Veliki vrtlozi djeluju na male vrtloge, na način da ih hrane energijom srednjeg toka; Manji vrtlozi djeluju na još manje vrtloge, i tako sve do viskoznosti.“*

Richardsonov opis ukazuje na ideju da mehanička energija prolazi kroz tzv. „kaskade“, odnosno prenosi se s većih na sve manje skale dok u konačnici ne biva disipirana, pretvorena u toplinsku energiju na molekularnoj razini.

Bitno je spomenuti i Taylorovu definiciju turbulencije iz 1922. godine:

*„Turbulencija je nepravilno gibanje, koje se općenito javlja u fluidima, plinovima ili tekućinama, kada teku uz čvrstu prepreku ili čak kada susjedne struje istog fluida teku pored ili jedna iznad druge.“*

Ovaj opis turbulencije odražava činjenicu da turbulentni vrtlozi u atmosferi najčešće nastaju uslijed smicanja vjetra. Ovim procesom nastaju prvenstveno mali turbulentni vrtlozi kojima se vrlo efektivno prenosi impuls na površinu te toplina i vlaga s podloge.

Tennekes i Lumley (1971) daju svoj opis turbulencije; navode uvjete koje strujanje mora ispunjavati da bi se smatralo turbulentnim. Dakle, fluid mora strujati neregularno, difuzivno, šireći svoje osobine u 3D prostoru i vremenu, imati veliki Reynoldsov broj, 3D fluktuacije vrtložnosti, disipaciju i kontinuitet.

Kako točan mehanizam nastanka i razvoja turbulencije još uvijek nije poznat, glavne metode proučavanja turbulencije su one statističke, a jedna od najvažnijih je svakako Reynoldsova dekompozicija s Reynoldsovim usrednjavanjem.

## 2.2 *Reynoldsova dekompozicija*

U turbulentnom strujanju vremenske su fluktuacije polja brzine, potencijalne temperature, tlaka, itd. posljedica prolaska vrtloga različitih dimenzija kroz npr. točke u kojima se vrše mjerenja spomenutih varijabli. Kako bi ta mjerenja ipak vjerodostojno opisivala stanje na većoj skali (ne zanima nas svaki pojedini vrtlog, već njihovo ukupno djelovanje), potrebno je napraviti usrednjavanje osnovnog strujanja na intervalu koji je dovoljno dug da „isključí“ male sporadične vrtloge, a istovremeno dovoljno kratak da zadrži eventualne trendove u polju promatrane veće skale.

Stoga, moguće je razložiti polja osnovnih meteoroloških parametara na sporo promjenjivu komponentu,  $\bar{a}$ , i brzo fluktuirajuću turbulentnu komponentu,  $a'$ :

$$a = \bar{a} + a', \quad (2.1)$$

gdje srednjaci fluktuacija po definiciji iščezavaju ( $\overline{a'} = 0$ ). Umnošci srednjaka i fluktuacija primjenom usrednjavanja nestaju ( $\overline{\bar{a}a'} = 0$ ).

Dalje vrijedi:

$$\overline{ab} = \overline{(\bar{a} + a')(\bar{b} + b')} = \bar{a}\bar{b} + \overline{a'b'}. \quad (2.2)$$

Dakle, promatranjem turbulentnih varijanci ( $\overline{a'^2}$ ) i kovarijanci ( $\overline{a'b'}$ ) dobivamo uvid u turbulentna svojstva fluida (npr. Stull, 1988).

Bitno je napomenuti kako je ovaj postupak opravdan ako postoji spektralni rascjep između gibanja na makro- i mikroskali (npr. Kaimal i Finnigan, 1994).

### 2.3 Skala usrednjavanja

Skala vremenskog usrednjavanja određuje se na temelju položaja spektralnog rascjepa između gibanja na velikim i malim skalama. Pravilna provedba Reynoldsove dekompozicije (2.1) podrazumijeva da takav rascjep postoji. Spektralni rascjep određuje se iz Fourierovog spektra snage promatranog meteorološkog elementa. Na spektru se on uočava kao minimum koji se nalazi između dva maksimuma. Jedan maksimum odgovara gibanjima velikih skala, dok drugi odgovara gibanjima malih skala. Frekvencija, odnosno period koji odgovara položaju spektralnog rascjepa, predstavlja skalu vremenskog usrednjavanja.

Pogrešnom procjenom skale usrednjavanja dolazimo do podcjenjivanja ili precjenjivanja turbulentnih gibanja. Uz to, bitno je napomenuti kako se skala usrednjavanja ne mijenja samo s obzirom na promatrani fenomen, već i s obzirom na odabranu lokaciju (Večenaj, 2012).

Nakon određivanja prikladne skale usrednjavanja, moguće je odrediti turbulentne perturbacije. Odgovarajućim blok usrednjavanjem mogu se odrediti varijance i kovarijance turbulencije. U ovom radu analizirani su upravo članovi osnovnih prognostičkih jednadžbi za varijance.

## 2.4 Prognošičke jednačbe za varijance

Prognošička jednačba za varijance brzine vjetra dana je sljedećim izrazom (sve oznake imaju standardno značenje):

$$\frac{\overline{\partial u'_i{}^2}}{\partial t} = \underbrace{-\bar{U}_j \frac{\partial \overline{u'^2}}{\partial x_j}}_{\text{II}} + \underbrace{2\delta_{i3}g \frac{\overline{u'_i\theta'_v}}{\theta_v}}_{\text{III}} - \underbrace{2\overline{u'_i u'_j}}_{\text{IV}} \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} - \underbrace{\frac{\partial \overline{u'_j u'^2}}{\partial x_j}}_{\text{V}} - \underbrace{\frac{2}{\bar{\rho}} \frac{\partial \overline{u'_i p'}}{\partial x_j}}_{\text{VI}} - \underbrace{2\nu \left( \frac{\partial \overline{u'_i}}{\partial x_j} \right)^2}_{\text{VII}} \quad (2.3)$$

gdje članovi redom predstavljaju:

- I = lokalna promjena varijance,
- II = advekcija varijance srednjim vjetrom,
- III = uzgonski član produkcije ili gubitka,
- IV = mehanička produkcija,
- V = turbulentni transport,
- VI = preraspodjela varijance tlakom,
- VII = viskozna disipacija.

Uzgonski član (III) predstavlja ponor ili izvor turbulencije, ovisno o predznaku turbulentnog toka topline ( $\overline{w'\theta'_v}$ ). Ako je turbulentni tok topline pozitivan (obično danju nad kopnom), uzgonski član proizvodi turbulenciju. S druge strane, ako je turbulentni tok topline negativan (obično noću nad kopnom), uzgonski član guši turbulentnu varijancu. Mehanička produkcija (IV) u pravilu je produkcijski član. Predstavlja međudjelovanje turbulentnog toka impulsa  $\overline{u'_i u'_j}$ , koji je najčešće negativan, i smicanja srednjeg vjetra koje je u pravilu pozitivno u atmosferskom graničnom sloju. Član turbulentnog transporta (V) opisuje transport varijance, odnosno energije, turbulentnim vrtlozima. Nadalje, član preraspodjele varijance tlakom (VI) opisuje preraspodjelu varijance zbog postojanja gradijenta tlaka u polju strujanja. Ovaj član odgovoran je za izgladivanje nehomogenosti i neizotropnosti turbulentnih polja. I konačno, viskozna disipacija (VII) uvijek predstavlja ponor varijance turbuletnih polja.

Kinetička energija turbulencije (TKE<sup>3</sup>) jednaka je:

$$TKE = \frac{1}{2} (u'^2 + v'^2 + w'^2). \quad (2.4)$$

Dakle, prognostičku jednadžbu za TKE možemo dobiti zbrajanjem prognostičkih jednadžbi za horizontalne i vertikalnu varijancu te dijeljenjem s dva. Stoga, pojedina varijanca turbulencije predstavlja komponentu TKE-a.

U ovom je radu u (2.3) uvedena pretpostavka horizontalne homogenosti. Horizontalna homogenost podrazumijeva da derivacije (odnosno, promjene) promatranih polja u horizontalnim ( $x$  i  $y$ ) smjerovima iščezavaju. Nadalje, izravna analiza nije provedena na članu preraspodjele varijance tlakom jer mjerenja tlaka nisu vršena. Uvođenjem ovih pretpostavki u (2.3) dobivamo:

$$\frac{\partial \overline{u'^2}}{\partial t} = -\overline{w'} \frac{\partial \overline{u'^2}}{\partial z} + 2\delta_{i3} g \frac{\overline{u'_i \theta'_v}}{\overline{\theta'_v}} - 2\overline{u'_i w'} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial z} - \frac{\partial \overline{w' u'^2}}{\partial z} - 2\nu \overline{\left( \frac{\partial u'_i}{\partial z} \right)^2} + R \quad (2.5)$$

gdje su sve oznake iste kao i u (2.3), a  $R$  predstavlja rezidualni član (zbroj svih članova koji nisu mogli biti izravno određeni). U okviru ovog rada analizirane su samo horizontalne komponente jednadžbe jer su članovi vertikalne komponente za red veličine manji od horizontalnih.

Glavni je fokus ovog rada na članu turbulentnog transporta. Upravo ovaj član sadrži triplet kovarijance. Dakle, glavni fokus ovog rada bit će analiza transporta varijanci (a time i komponenti kinetičke energije turbulencije) turbulentnim vrtlozima. Detaljna analiza provest će se i na članu viskozne disipacije.

---

<sup>3</sup> engl. *turbulent kinetic energy*

## 2.5 Viskozna disipacija

Viskozna disipacija ultimativni je ponor turbulencije. Ona je odgovorna za gušenje turbulentnih vrtloga. Viskozna disipacija dana je izrazom:

$$\varepsilon = \nu \left[ \overline{\left(\frac{\partial u'}{\partial z}\right)^2} + \overline{\left(\frac{\partial v'}{\partial z}\right)^2} + \overline{\left(\frac{\partial w'}{\partial z}\right)^2} \right], \quad (2.6)$$

gdje je uvedena pretpostavka horizontalne homogenosti. Prethodna relacija za potrebe ovog rada može se prikazati kao:

$$\varepsilon = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z, \quad (2.7)$$

gdje je  $\varepsilon_x = \nu \overline{\left(\frac{\partial u'}{\partial z}\right)^2}$ ,  $\varepsilon_y = \nu \overline{\left(\frac{\partial v'}{\partial z}\right)^2}$ ,  $\varepsilon_z = \nu \overline{\left(\frac{\partial w'}{\partial z}\right)^2}$ .

Za određivanje viskozne disipacije izravnom metodom, iz (2.6), potrebna su izuzetno viskokofrekventna mjerenja u vremenu. Kako takva mjerenja najčešće nisu dostupna, viskozna disipacija standardno se određuje metodom inercijalne disipacije (engl. *Inertial Dissipation Method*, IDM) (npr. Tennekes i Lumely, 1972). Glavna pretpostavka ove metode je postojanje tzv. inercijalnog područja<sup>4</sup>. Unutar inercijalnog područja spektar snage longitudinalne komponente brzine u logaritamskoj reprezentaciji prati pravac koeficijenta smjera  $-\frac{5}{3}$ . Dakle, unutar inercijalnog područja za logaritam spektra snage longitudinalne komponente brzine vjetra ( $S_u$ ) vrijedi:

$$\log(S_u(k)) = -\frac{5}{3} \log(k) + \log(\alpha_u \varepsilon^{\frac{2}{3}}), \quad (2.8)$$

---

<sup>4</sup> Inercijalno područje energetsko je područje u kojem vrtlozi spontano pucaju te prenose energiju na progresivno sve manje vrtloge. Vrtlozi unutar ovog područja nisu pod direktnim utjecajem vrtloga većih skala, ali niti manje, disipativne skale.



gdje je  $\alpha_u$  odgovarajuća Kolmogorova konstanta, a  $k$  je valni broj. U ovom radu se uzima  $\alpha_u = 0,53$  (npr. Večenaj i sur., 2010; Večenaj i sur., 2012). Sređivanjem izraza (2.7) slijedi:

$$\varepsilon = \left( \frac{k^{5/3} S_u(k)}{\alpha_u} \right)^{3/2}. \quad (2.9)$$

U ovom radu koristi se alternativna verzija prethodnog izraza (2.8) koja u sebi sadrži frekvenciju umjesto valnog broja. Međutim, da bi transformacija iz vremenske u frekvencijsku domenu bila opravdana, potrebno je provjeriti valjanost Taylorove hipoteze o tzv. „zamrznutoj turbulenciji“ koja postavlja uvjet na omjer standardne devijacije i srednjaka longitudinalnog smjera vjetra:

$$\frac{\sigma_u}{\bar{u}} \leq 0,5. \quad (2.10)$$

Konačno, korišteni izraz za proračun viskozne disipacije inercijskom metodom glasi:

$$\varepsilon = \frac{2\pi}{\bar{u}} \left( \frac{f^{5/3} S_u(f)}{\alpha_u} \right)^{3/2}. \quad (2.11)$$

Metoda inercijalne disipacije standardna je metoda za određivanje ukupne viskozne disipacije dane s (2.6). Međutim, u (2.5) i (2.3) viskozna disipacija razdvojena je na komponente. Ne postoji standardna metoda za određivanje pojedine komponente viskozne disipacije. U okviru ovog rada viskozna disipacija po komponentama ( $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$ ,  $\varepsilon_z$ ) određena je uz pomoć izravne metode (2.3), odnosno:

$$\varepsilon_i = \nu \overline{\left( \frac{\partial u'_i}{\partial z} \right)^2}. \quad (2.12)$$

Dakle, korištena je izravna metoda iako dostupna mjerenja nisu dovoljno visokofrekventna (u mjeri koju zahtijeva izravna metoda).

## 2.6 Parametrizacija viskozne disipacije

U numeričkim meteorološkim modelima turbulencija se parametrizira jer jednačbe koje opisuju turbulentna strujanja nisu zatvorene. Viskozna disipacija u većini numeričkih modela parametrizira se pomoću TKE na način:

$$\varepsilon = a \frac{TKE^{1,5}}{\Lambda}, \quad (2.13)$$

gdje je  $a$  konstanta, a  $\Lambda$  empirijska skala duljine koja ukazuje na veličinu turbulentnih vrtloga (npr. Stull, 1988; Večenaj i sur., 2012). U (2.13) implicitno je pretpostavljena homogenizacija i barem djelomična izotropizacija disipirajuće turbulencije, a što nije uvijek ispunjeno.

## 3 Podaci

### 3.1 Lokacija mjernog tornja

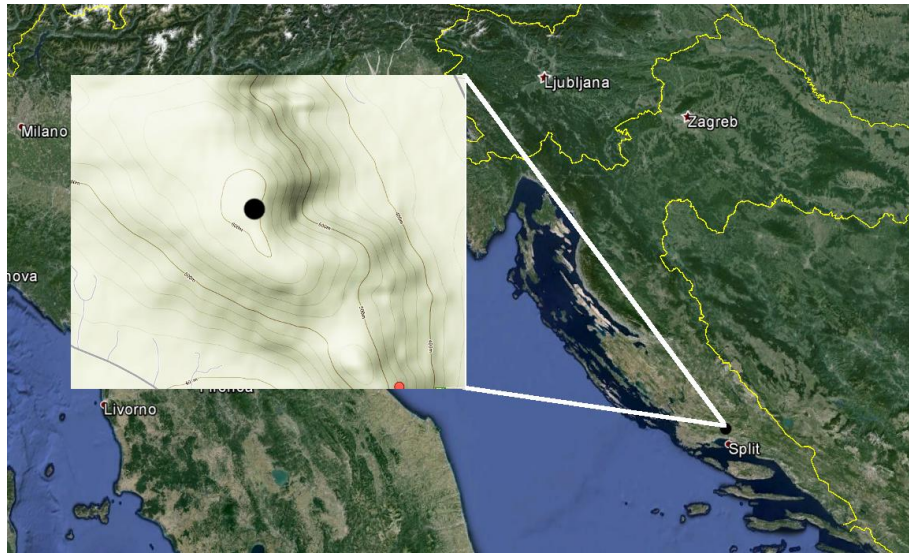
Podaci korišteni u ovom radu skupljeni su na mjernom tornju postavljenom na Pometenom brdu ( $43^{\circ}36' N$ ,  $16^{\circ}28' E$ ), nedaleko od Dugopolja u zaleđu grada Splita. Mjerni toranj bio je aktivan od travnja 2010. do lipnja 2011. godine.

Kako je splitsko područje najvjerojatnije drugo po redu najjačih i najučestalijih udara bure u Hrvatskoj (npr. Orlić i sur., 1994), sama lokacija mjernog tornja vrlo je povoljna za proučavanje bure (slika 1).



Slika 1: Jačine bure i srednji smjerovi duž istočne obale Jadranskog mora. Splitsko područje drugo je po redu u smislu jačine bure u Hrvatskoj, odmah iza Senja (prema Orlić i sur., 1994).

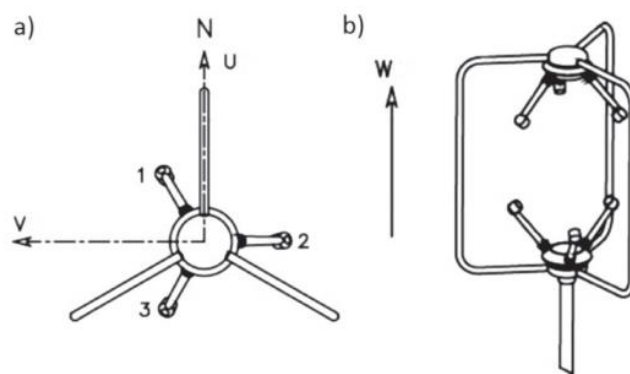
Slika 2 prikazuje orijentaciju i orografiju Pometenog brda. Približna okomitost samog brda na smjer puhanja bure povoljna je za proučavanje bure. Toranj je okružen kompleksnim heterogenim terenom.



Slika 2: Satelitski prikaz Jadranskog mora. Uvećani prozor prikazuje opografiju i izohipse u okolini mjenenog tornja. Crni kružić prikazuje točan položaj samog tornja. Preuzeto iz Babić, 2013.

Mjerni toranj s tri "WindMaster Pro" ultrasonična anemometra (*Gill Instruments*) bio je postavljen na vrhu Pometenog brda. Pritom su vršena mjerenja triju komponentata brzine vjetra ( $u$ ,  $v$ ,  $w$ ) te sonične temperature ( $T_s$ ). Mjerenja su vršena frekvencijom uzorkovanja od 5 Hz na tri nivoa, 10, 22 i 40 m.

Vlastiti koordinatni sustav anemometra ima apscisu orijentiranu prema sjeveru i ordinatu prema zapadu (slika 3), te je pri obradi podataka bilo potrebno izvršiti transformaciju u standardni desni koordinatni sustav ( $u = -V$ ,  $v = U$ ,  $w = W$ , uvažavajući oznake na slici 3).



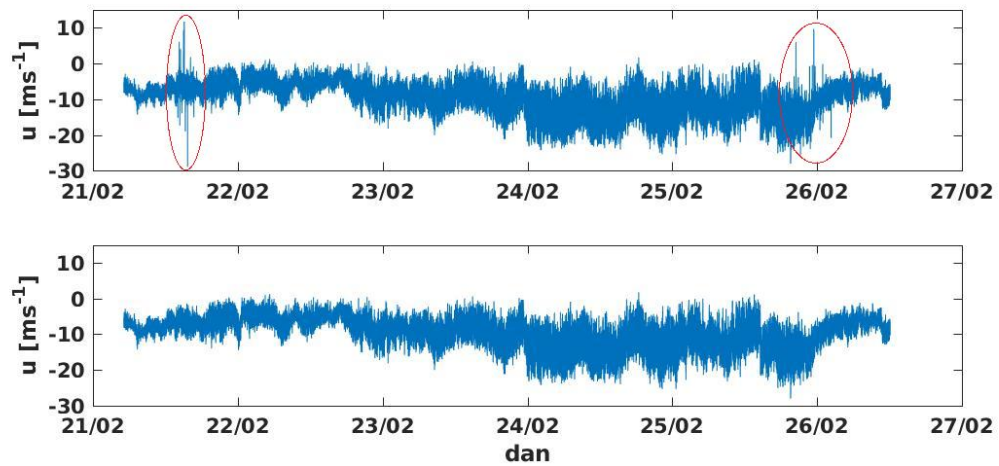
Slika 3: Prikaz ultrasoničnog anemometra korištenog za dobivanje podataka: a) anemometar gledan odozgo: prikazan je vlastiti koordinatni sustav; b) anemometar postavljen na vertikalni stup, uz označen smjer vertikalne komponente brzine vjetera. Preuzeto iz Babić, 2013.

### 3.2 Kontrola kvalitete podataka

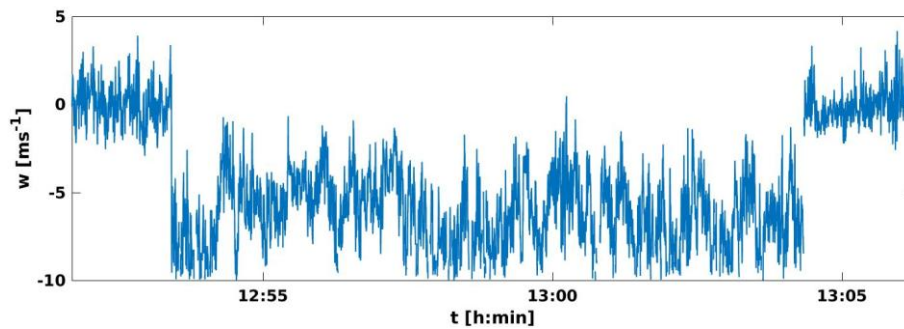
Prije analize podataka potrebno je izvršiti kontrolu istih. Naime, prilikom mjerenja moguća je pojava pogrešaka. Razlozi pogrešaka mogu biti različiti, npr. sustavne pogreške, slučajne pogreške, kvar na instrumentu, itd. Bitno je detektirati takve pogreške i prikladno ih ukloniti kako bi daljnja analiza bila vjerodostojna.

U ovom su radu prije same analize uklonjeni „stršeći“ podaci koji ne pripadaju globalnom ponašanju niza, eng. *outlieri*. Na slici 4 prikazan je vremenski niz prije i poslije kontrole kvalitete podataka. Outlieri predstavljaju individualne podatke koji vidljivo odstupaju od globalnog ponašanja niza. U ovom radu outlieri su uklonjeni ručno, a na njihovom mjestu postavljene su vrijednosti dobijene linearnom interpolacijom.

Osim ovakvih izoliranih vrijednosti u samim podacima pojavili su se i relativno kratki vremenski nizovi podataka s nefizikalnim vrijednostima. Primjer je vidljiv na slici 5 gdje je prikazan vremenski niz vertikalne brzine,  $w$ . Instrument je izmjerio nagli odrezani pad vertikalne brzine. Vrijednosti koje pokazuje mjerni instrument prevelike su po apsolutnom iznosu da bi bile fizikalno opravdane. Takvi su dijelovi vremenskih nizova izbačeni iz analize.



Slika 4: Vremenski nizovi horizontalne komponente brzine ( $u$ ) nepročišćenih (gore) i pročišćenih (dolje) podataka. Vremenski nizovi odgovaraju najduljoj epizodi bure, odnosno buri 35 (tablica 1). Stršeći podaci zaokruženi su crvenom bojom. Stršeći podaci zamijenjeni su vrijednostima dobijenim linearnom interpolacijom.



Slika 5: Dio vremenskog niza vertikalne brzine ( $w$ ) najdulje epizode bure (bura 35, tablica 1). Uočavamo nefizikalne vrijednosti vertikalnih brzina do  $-10 \text{ m s}^{-1}$ . Ovakvi dijelovi nizova izbačeni su iz analize.

### 3.3 *Definicija epizoda bure*

U okviru ovog rada epizode bure definirane su na sljedeći način:

- 10-minutni srednjaci smjera vjetra moraju biti unutar intervala kuteva  $[25^\circ, 85^\circ]$ . Ovo odgovara sjeveroistočnom smjeru puhanja vjetra.
- Duljina puhanja vjetra mora biti najmanje 10 h.
- Srednja brzina vjetra na međunivou od 25 m mora biti veća od  $5 \text{ m s}^{-1}$ .

Na temelju navedenih kriterija izdvojeno je ukupno 60 epizoda bure ukupnog trajanja 2064 h. Statistički opis pojedine epizode dan je u tablici 1.

Analiza turbulentnih karakteristika bure provedena je u koordinatnom sustavu poravnatom sa smjerom srednjeg horizontalnog vjetra. U tu svrhu koordinatni je sustav rotiran na način da nova  $x$ -os bude poravnata sa smjerom srednjeg horizontalnog vjetra na međunivou od 25 m. Smjer srednjeg horizontalnog vjetra određen je linearnom interpolacijom izmjerenih brzina vjetra na 10 i 40 m. U ovakvom koordinatnom sustavu  $x$  komponenta smjera vjetra ( $u$ ) nosi većinu varijance (energije).

Nadalje, potrebno je napomenuti da je svaka epizoda bure, po potrebi, skraćena na cijeli broj 30-min intervala. Skraćivanje samih epizoda pokazalo se korisnim u daljnjoj analizi.

Tablica 1: Kronologija epizoda bure. Naznačeno je vrijeme početka i kraja puhanja bure, ukupno trajanje te srednja i maksimalna brzina na svakom od promatranih nivoa (10, 22 i 40 m).

KRONOLOGIJA EPIZODA BURE					10 m		22 m		40 m	
#	GODINA [y.]	POČETAK [d.m., h:min]	KRAJ [d.m., h:min]	TRAJANJE [h:min]	$v_{max}$ [m s <sup>-1</sup> ]	$v_{sr}$ [m s <sup>-1</sup> ]	$v_{max}$ [m s <sup>-1</sup> ]	$v_{sr}$ [m s <sup>-1</sup> ]	$v_{max}$ [m s <sup>-1</sup> ]	$v_{sr}$ [m s <sup>-1</sup> ]
1	2010.	16.4., 22:22	17.4., 15:52	18:30	15,3	6,5	15,4	7,3	15,6	7,5
2	2010.	17.4., 20:22	18.4., 7:22	11:00	10,5	5,4	10,3	5,9	10,3	6,2
3	2010.	28.4., 19:13	29.4., 9:13	14:00	18,1	7,5	18,4	8,6	18,9	9,2
4	2010.	18.5., 21:34	19.5., 10:34	13:00	13,6	5	13,2	6	13,2	6,4
5	2010.	19.5., 19:44	21.5., 4:44	33:00	20,1	7,6	21,8	9,2	22,2	10
6	2010.	21.5., 5:14	21.5., 21:44	17:30	16,6	7,1	18,5	8,5	17,7	9,5
7	2010.	22.5., 8:44	23.5., 0:14	16:30	17,1	5,5	18	6,8	18,2	7,8
8	2010.	4.6., 21:4	5.6., 20:34	24:30	18	6,4	19,2	7,6	20	8,2
9	2010.	27.6., 16:44	28.6., 7:44	15:00	16,9	5,5	16,8	6,7	18,3	7,5
10	2010.	18.7., 15:44	19.7., 9:14	18:30	17,6	6	16,6	6,7	16,7	6,8
11	2010.	24.7., 20:34	27.7., 10:34	62:00	24,9	9	24,9	10,6	25,71	11,4
12	2010.	21.8., 15:19	22.8., 11:49	21:30	13	5	13,5	5,7	16,4	6
13	2010.	28.8., 19:59	30.8., 6:29	35:30	27,2	7,6	29,4	8,9	28,9	9,5



<b>KRONOLOGIJA EPIZODA BURE</b>					10 m		22 m		40 m	
#	<b>GODINA</b> [y.]	<b>POČETAK</b> [d.m., h:min]	<b>KRAJ</b> [d.m., h:min]	<b>TRAJANJE</b> [h:min]	$v_{max}$ [m s <sup>-1</sup> ]	$v_{sr}$ [m s <sup>-1</sup> ]	$v_{max}$ [m s <sup>-1</sup> ]	$v_{sr}$ [m s <sup>-1</sup> ]	$v_{max}$ [m s <sup>-1</sup> ]	$v_{sr}$ [m s <sup>-1</sup> ]
14	2010.	10.9., 9:39	12.9., 9:39	48:00	22,5	8,1	22,8	9,5	23,4	10,1
15	2010.	13.9., 18:59	15.9., 7:29	37:30	15,1	5	16,3	5,8	15,5	6,2
16	2010.	19.9., 14:59	21.9., 3:29	37:30	17,6	5,6	18	6,6	18,5	7
17	2010.	6.10., 18:29	9.10., 18:59	73:30	15,7	5,6	16,6	6,3	17,3	6,6
18	2010.	13.10., 18:49	15.10., 14:19	44:30	15,1	5,1	15,7	5,7	14,3	5,8
19	2010.	17.10., 22:59	20.10., 4:59	54:00	27,3	7,8	26,8	9,1	26,2	9,4
20	2010.	25.10., 13:29	28.10., 19:59	79:30	30,5	9,5	31,5	10,8	30,8	11,2
21	2010.	27.11., 15:29	28.11., 9:29	18:00	21,9	7	19,8	7,6	19,4	7,9
22	2010.	30.11., 0:49	30.11., 17:19	17:30	20,3	6,4	15,5	6,8	15	6,9
23	2010.	9.12., 17:6	10.12., 8:6	15:00	32,6	11,7	31,9	13,3	33,8	14,5
24	2010.	12.12., 17:16	17.12., 10:16	113:00	30	8,6	29,3	9,5	27,8	10,2
25	2010.	25.12., 19:26	28.12., 12:26	65:00	26	6,6	27,8	7,2	26,9	7,5
26	2011.	2.1., 14:16	4.1., 10:46	45:30	30,1	8,1	27,2	8,6	27,3	9,2
27	2011.	20.1., 3:36	25.1., 0:36	117:00	40,9	11,2	36,7	11,8	35,2	12,1
28	2011.	26.1., 21:16	27.1., 13:46	17:30	16,2	7	13,8	7,2	13,7	7,5
29	2011.	27.1., 14:16	29.1., 11:16	45:00	17,8	8,5	16,3	8,7	15,9	9

<b>KRONOLOGIJA EPIZODA BURE</b>					10 m		22 m		40 m	
#	<b>GODINA</b> [y.]	<b>POČETAK</b> [d.m., h:min]	<b>KRAJ</b> [d.m., h:min]	<b>TRAJANJE</b> [h:min]	$v_{max}$ [m s <sup>-1</sup> ]	$v_{sr}$ [m s <sup>-1</sup> ]	$v_{max}$ [m s <sup>-1</sup> ]	$v_{sr}$ [m s <sup>-1</sup> ]	$v_{max}$ [m s <sup>-1</sup> ]	$v_{sr}$ [m s <sup>-1</sup> ]
30	2011.	31.1., 1:16	31.1., 14:46	14:30	11,6	5,3	12,7	5,6	10,9	5,8
31	2011.	2.2., 12:36	3.2., 17:6	29:30	23,5	10,2	24	11,2	23,9	11,6
32	2011.	3.2., 17:26	4.2., 20:56	28:30	26,3	8,5	26,9	9,7	25,9	10,3
33	2011.	17.2., 21:56	18.2., 13:26	16:30	12,9	5,27	13,3	5,6	12,9	5,8
34	2011.	18.2., 15:26	20.2., 10:26	43:00	20,8	8,2	21,5	9,1	20,7	9,8
35	2011.	21.2., 5:6	26.2., 12:6	127:00	31,9	11,4	33	12,6	32	13,1
36	2011.	28.2., 22:56	1.3., 12:26	14:30	15	7,5	15,8	8,2	14,8	8,6
37	2011.	2.3., 21:4	3.3., 9:34	13:30	14,6	7	15,6	7,7	14,6	8,3
38	2011.	3.3., 19:6	4.3., 10:6	15:00	13,4	5,8	13,3	6,2	14	6,3
39	2011.	6.3., 2:6	8.3., 0:36	47:30	35,8	11,7	37,1	13,3	34,8	14,5
40	2011.	8.3., 1:6	9.3., 1:36	25:30	24,3	7,1	23,8	7,9	24,4	8,1
41	2011.	18.3., 20:46	22.3., 8:46	84:00	27,4	11	28,3	12	28,5	13
42	2011.	22.3., 11:26	23.3., 4:56	18:30	16,7	6	16	6,8	15,9	7,2
43	2011.	23.3., 16:16	24.3., 11:16	19:00	18,6	7,3	19,4	8,2	19,5	8,6
44	2011.	28.3., 22:26	29.3., 13:56	16:30	13,7	5,8	14	6,3	14,3	6,6
45	2011.	9.4., 15:55	10.4., 14:25	23:30	23,3	7,4	25,3	8,6	25	9,3

<b>KRONOLOGIJA EPIZODA BURE</b>					10 m		22 m		40 m	
#	<b>GODINA</b> [y.]	<b>POČETAK</b> [d.m., h:min]	<b>KRAJ</b> [d.m., h:min]	<b>TRAJANJE</b> [h:min]	$v_{max}$ [m s <sup>-1</sup> ]	$v_{sr}$ [m s <sup>-1</sup> ]	$v_{max}$ [m s <sup>-1</sup> ]	$v_{sr}$ [m s <sup>-1</sup> ]	$v_{max}$ [m s <sup>-1</sup> ]	$v_{sr}$ [m s <sup>-1</sup> ]
46	2011.	11.4., 11:5	12.4., 1:35	15:30	16,6	6,1	18,6	7,1	15,6	7,3
47	2011.	13.4., 0:5	13.4., 18:5	18:00	30,6	12,4	28,6	14,2	34,6	15,1
48	2011.	15.4., 1:35	17.4., 11:35	58:00	19,9	7,9	20,6	9	19,9	9,4
49	2011.	17.4., 13:15	18.4., 14:45	26:30	18,4	7,6	18,9	8,8	18,5	9,2
50	2011.	18.4., 18:25	19.4., 8:25	14:00	12,4	5,2	13	5,7	13	5,8
51	2011.	30.4., 21:55	1.5., 15:25	18:30	15,6	6,3	15,6	7	15,1	7,3
52	2011.	3.5., 1:45	3.5., 18:45	17:00	18,6	7,1	17,7	7,8	17,4	8,1
53	2011.	3.5., 22:45	6.5., 9:45	59:00	24,3	7,6	23,7	8,9	23,6	9,7
54	2011.	8.5., 17:5	10.5., 21:5	52:00	32,3	11,5	33,4	13,4	32,8	13,8
55	2011.	11.5., 12:5	12.5., 3:5	15:00	21,5	6,4	22,5	7,9	23,6	7,8
56	2011.	16.5., 0:55	18.5., 7:55	55:00	28,2	10	29,1	11,7	28,4	12,6
57	2011.	24.5., 16:5	26.5., 7:5	39:00	20,1	7,4	19,6	8,6	19,2	8,8
58	2011.	29.5., 13:35	30.5., 8:35	19:00	13,8	5,2	14,1	6,1	15	6,5
59	2011.	2.6., 16:35	3.6., 12:35	20:00	16,5	6,6	16,8	7,7	16,6	8
60	2011.	11.6., 17:45	12.6., 11:15	18:30	15,1	6,3	16	7,5	16,5	8,3

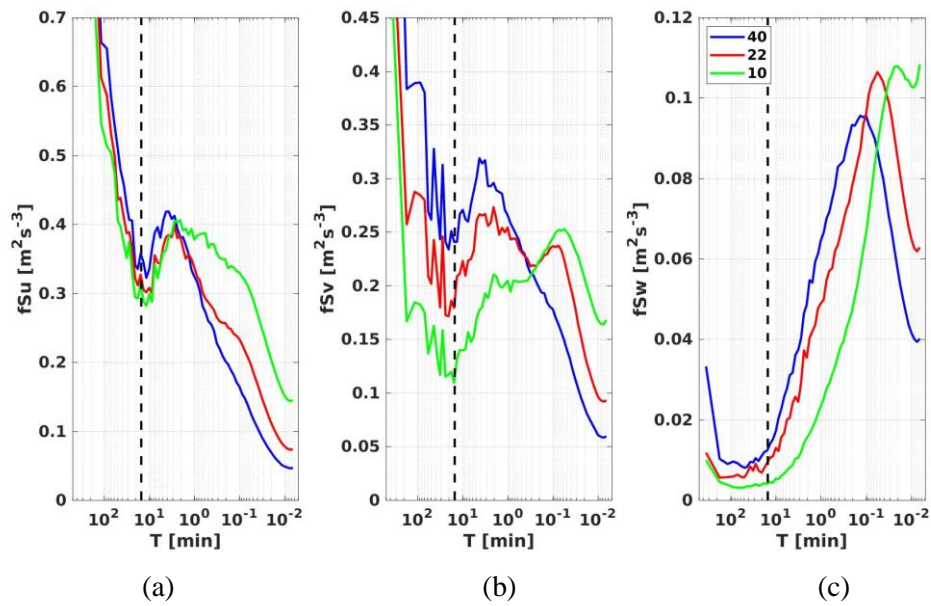
## 4 Rezultati

### 4.1 *Određivanje vremenske skale usrednjavanja*

Kako bismo mogli odrediti perturbacije brzine vjetra i temperature, potrebno je naći prikladnu vremensku skalu usrednjavanja. U tu su svrhu određeni spektri snage svih triju komponenti brzine za sve promatrane epizode bure. Prilikom računanja spektara snage korištena je Welchova metoda s prozorima duljine  $2^{17}$  za svaku epizodu bure. Duljina prozora odabrana je tako da je odabrana najveća moguća potencija baze 2 koja nije veća od samog broja podataka unutar najkraće epizode bure. Potencija baze 2 odabrana je zbog bržeg računa. Spektri su računati s 50% preklapanja prozora.

Nadalje, spektri su još dodatno izgladjeni na način da je logaritamska skala podijeljena na uniformne dekade unutar kojih je smješteno 16 ekvidistantnih srednjaka spektra (npr. Kaimal i Finnigan, 1994). Dobijeni spektri tada su otežani frekvencijom; kod takvih spektara površina ispod bilo kojeg dijela spektralne krivulje proporcionalna je varijanci, odnosno energiji koju nosi dotična komponenta brzine vjetra (npr. Stull, 1988), što je korisna osobina takvih grafova.

Na kraju je dobijen kompozitni spektar svih 60 epizoda bure. Medijani su dani na slici 6. Prikazani su medijani otežanih spektara svih triju komponenta brzine,  $u$ ,  $v$  i  $w$ , na sva tri nivoa. Vidljiv je spektralni procjep na spektrima  $u$  i  $v$  komponente brzine. Procijenjeno je da se spektralni procjep nalazi na periodu od  $T = 15$  min. U spektru vertikalne brzine spektralni procjep nije jasno vidljiv. Iako je ovakva procjena perioda usrednjavanja subjektivna i zasniva se čisto na vizualizaciji spektra, ona je u okviru ovog rada prihvaćena jer je u suglasnosti s drugim radovima na temu turbulencije bure na Pometenom brdu (Babić i sur., 2016).



Slika 6: Log-lin prikaz medijana otežanih spektara svih triju komponenti brzine: a) spektar  $S_u$ ; b) spektar  $S_v$ ; c) spektar  $S_w$ . Plavom, crvenom i zelenom linijom označen je spektar na 40, 22, odnosno, 10 m. Crtkana crna linija pokazuje period od 15 min koji ujedno odgovara i skali usrednjavanja.

## 4.2 *Turbulentne perturbacije*

Nakon što je određena prikladna vremenska skala usrednjavanja, provedena je Reynoldsova dekompozicija kojim su dobijene turbulentne perturbacije,  $u'$ ,  $v'$ ,  $w'$  i  $\theta'$ . Pritom je svaka epizoda bure podijeljena na 15-minutne blokove. Turbulentne perturbacije izračunate su oduzimanjem 15-minutnog srednjaka pripadne varijable od izmjerene vrijednosti iste varijable.

Daljnja analiza zasniva se na određivanju vremenskih nizova članova prognostičkih jednadžbi za varijance (2.5). Pritom su pojedini članovi blok usrednjeni na periodu od  $T = 30$  min. Vremenski nizovi članova određeni su na tri međunivoa, 16 m (međunivo između 10 i 22 m), 25 m (međunivo između 10 i 40 m) i 31 m (međunivo između 22 i 40 m). Detaljnija analiza provedena je na članu viskozne disipacije te će ona biti izložena u sljedeća tri potpoglavlja. Nakon toga dana je analiza članova jednadžbe (2.5).

## 4.3 *Proračun viskozne disipacije*

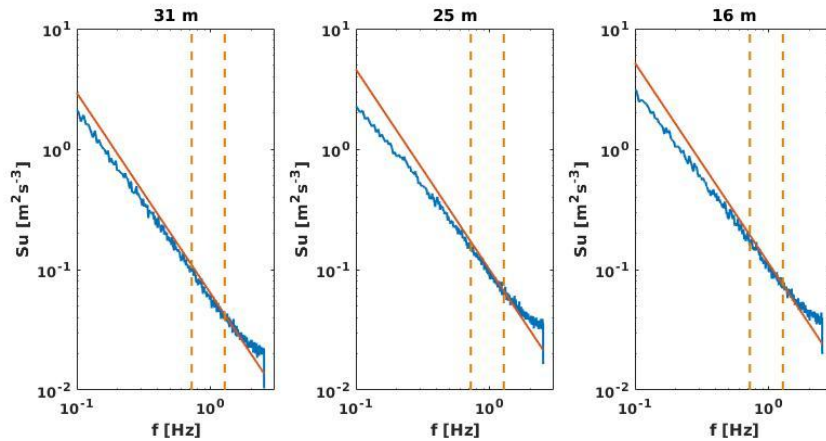
Viskozna disipacija ( $\epsilon$ ) u okviru ovog rada određena je na dva načina:

- metodom inercijske disipacije (2.11),
- izravnim proračunom iz prognostičkih jednadžbi za varijance (2.6).

Prvi korak pri provođenju metode inercijske disipacije jest pronalazak inercijalnog područja. Za određivanje inercijalnog područja potrebno je utvrditi u kojem frekvencijskom pojasu spektar longitudinalne komponente brzine prati pravac  $y = -5/3x$  na logaritamskom grafu.

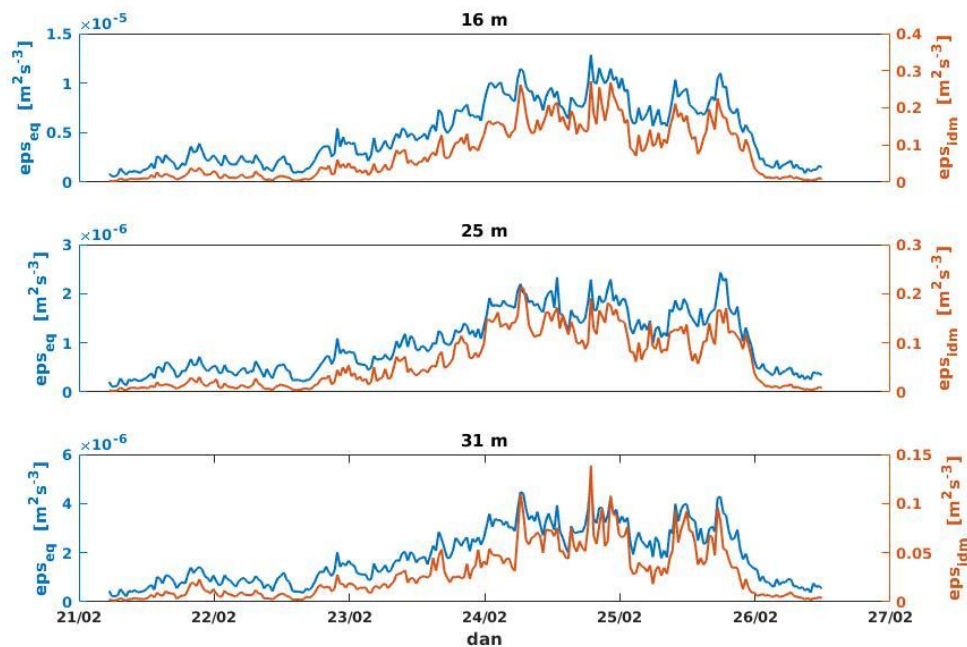
U tu su svrhu određeni spektri longitudinalne komponente brzine na sva tri međunivoa. Spektri su određeni Welchovom metodom s prozorom duljine 600 (što odgovara vremenskom razdoblju od 2 min) te bez preklapanja između prozora. Spektri su određeni na način da je svaka bura podijeljena na 30-min blokove te je za svaki 30-min blok određen spektar. Nakon toga je dobijen kompozitni spektar za pojedinu epizodu bure te

je za svaku epizodu bure utvrđeno inercijalno područje. Na slici 7 prikazani su medijani za najdulju epizodu bure (bura 35, tablica 1). Nakon pronalaska frekvencijskog pojasa u kojem se nalazi inercijalno područje, prema (2.11) određena je viskozna disipacija za svaki 30-min blok i za svaku epizodu bure.



Slika 7: Kompozit spektra (prikazani su medijani) longitudinalne komponente brzine vjetra. Crvenom bojom prikazan je pravac  $y = -5/3x$  u logaritamskoj reprezentaciji. Žute isprekidane linije prikazuju inercijalno područje. Odabrano je područje u kojem pravac najbolje prati spektral na svim visinama. Inercijalno područje nalazi se unutar frekvencija [0,72 1,27] Hz.

Dalje je viskozna disipacija određena i izravno iz prognostičkih jednadžbi za varijance (2.6). Rezultati su prikazani na slici 8. Vidmo da se krivulje viskozne disipacije dobijene objema metodama dobro prate, ali su vrijednosti dobijene izravnom metodom za nekoliko redova veličine manje. Odnosno, direktna metoda daje dobar oblik krivulje, ali premale vrijednosti. Slični rezultati dobijeni su i za sve ostale epizode bure.



Slika 8: Vremenska ovisnost viskozne disipacije dobijene izravno iz jednadžbi (lijevo, plavo) i viskozne disipacije dobijene inercijskom metodom (desno, smeđe). Prikazani vremenski nizovi odgovaraju najduljoj epizodi bure (bura 35, tablica 1) na sva tri nivoa. Kvadrat koeficijenta korelacije na 16 i 25 m iznosi  $r^2 = 0.97$ , a na 31 m  $r^2 = 0.95$ .

#### 4.4 Veza između dvije metode određivanja viskozne disipacije

Budući da je direktna metoda uspješno reproducirala oblik krivulje viskozne disipacije, provedena je linearna regresija između ove dvije metode:

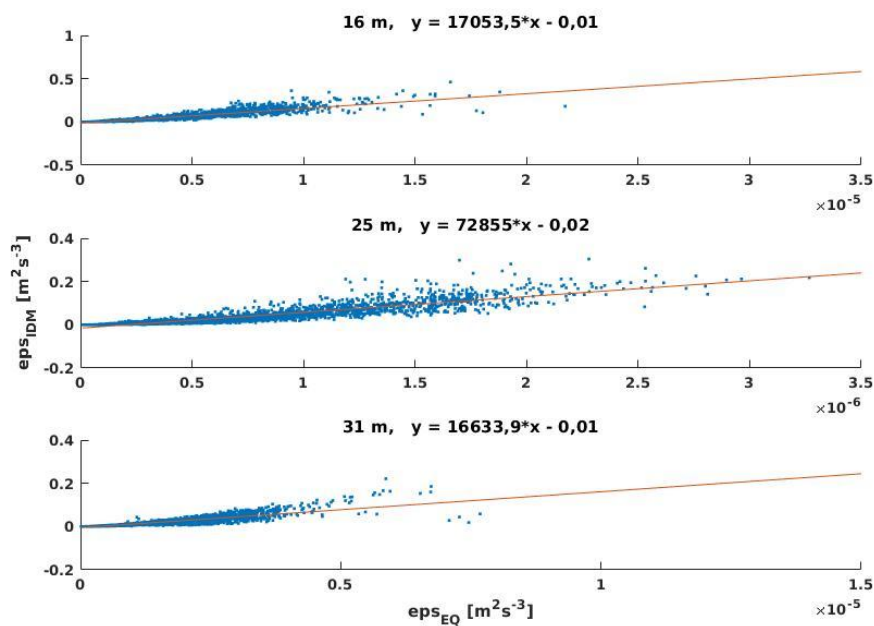
$$y = ax + b, \quad (4.1)$$

gdje  $y$  odgovara viskoznoj disipaciji dobijenoj inercijskom metodom ( $\epsilon_{IDM}$ ),  $x$  viskoznoj disipaciji dobijenoj izravnom metodom ( $\epsilon_{EQ}$ ),  $a$  je standardno koeficijent smjera pravca, a  $b$  odsječak na  $y$  osi.

Linearna regresija provedena je na cijelom setu podataka, za sve 30-min intervale svih izoliranih epizoda bure. Rezultati linearne regresije prikazani su na slici 9. Dobijeni koeficijenti smjera iznose  $a = 17053,5$  na nivou 16 m,  $a = 72855$  na nivou 25 m i konačno  $a = 16633,9$  na nivou 31 m. Koeficijenti  $b$  bliski su nuli,  $b = -0,01$  na 16 i



31 m te  $b = -0,02$  na 25 m. Očito je da se vrijednosti koeficijenata smjera mijenjaju s visinom. Na slici 9 možemo uočiti da je odstupanje od dobijenog pravca manje u području bliskom ishodištu. Raspršenje samih vrijednosti oko pravca povećava se povećanjem vrijednosti disipacije. Dakle, očekujemo da će linearna regresija biti najuspješnija upravo za relativno male vrijednosti viskozne disipacije. Najveće vrijednosti viskozne disipacije očekuju se kod najduljih i najjačih bura. U promatranom setu podataka slabije bure su brojnije od onih jačih te se zbog toga većina vrijednosti grupira oko ishodišta.



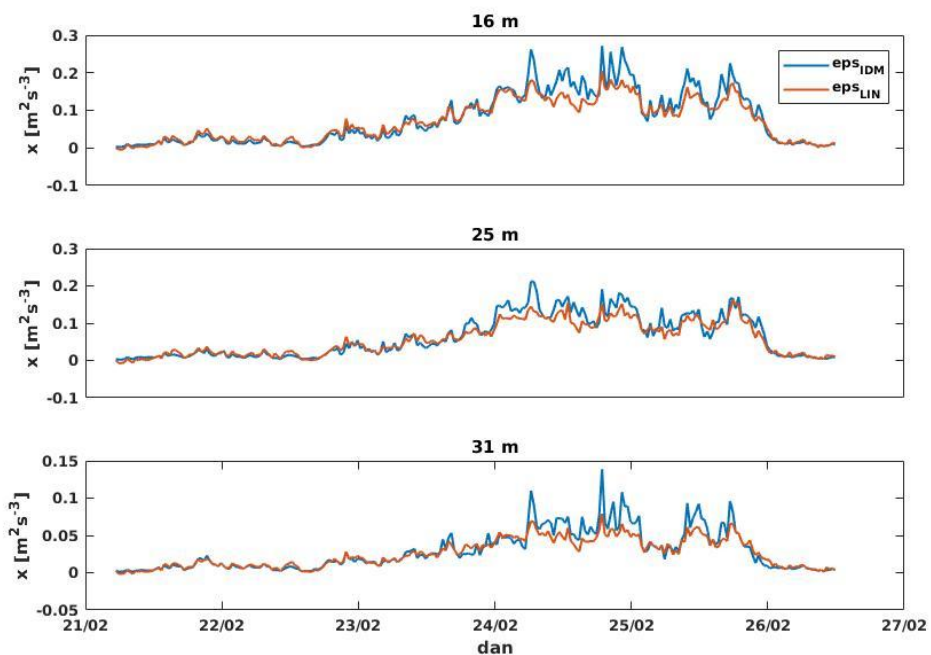
Slika 9: Linearna regresija između viskozne disipacije dobijene inercijskom,  $\epsilon_{IDM}$  i izravnom,  $\epsilon_{EQ}$ , metodom. Crvenom bojom prikazan je pravac dobijen linearnom regresijom. Vrijednosti koeficijenta smjera pravca te odsječka na y osi naznačene su u naslovu. Plavom bojom označene su vrijednosti  $\epsilon_{IDM}$  i  $\epsilon_{EQ}$ .

Uzimajući u obzir dobijene koeficijente  $a$  i  $b$  određena je viskozna disipacija dobijena linearnom regresijom ( $\epsilon_{LIN}$ ) prema:

$$\epsilon_{LIN} = a\epsilon_{EQ} + b, \quad (4.2)$$

gdje koeficijenti  $a$  i  $b$  poprimaju vrijednosti dobijene prethodnom linearnom regresijom. Rezultati za najdulju epizodu bure (bura 35, tablica 1) prikazani su na slici 10. Vidimo da

su odstupanja između  $\varepsilon_{IDM}$  i  $\varepsilon_{LIN}$  najmanja za relativno male vrijednosti disipacije. Razlike između  $\varepsilon_{IDM}$  i  $\varepsilon_{LIN}$  povećavaju se povećanjem samih vrijednosti disipacije;  $\varepsilon_{LIN}$  ne reproducira maksimalne vrijednosti  $\varepsilon_{IDM}$ . Također,  $\varepsilon_{LIN}$  u pojedinim slučajevima poprima negativne vrijednosti što nije fizikalno opravdano. Naime, viskozna disipacija ultimativni je ponor turbulencije te bi u (2.5) uvijek trebala predstavljati negativan član.  $\varepsilon_{IDM}$  je uvijek pozitivna te uz predznak minus u (2.5) uvijek odgovara ponoru turbulencije. Isto ne vrijedi za  $\varepsilon_{LIN}$  koja poprima negativne vrijednosti na samom početku i kraju pojedine epizode bure. Tada su vrijednosti  $\varepsilon_{EQ}$  male te uz negativne vrijednosti dobijenog koeficijenta  $b$  (4.2),  $\varepsilon_{LIN}$  postaje negativna.



Slika 10: Prikaz viskozne disipacije dobijene pomoću koeficijenata linearne regresije (smeđe) te viskozne disipacije dobijene inercijskom metodom (plavo). Kvadrat koeficijenta korelacije na 16 i 25 m iznosi  $r^2 = 0.97$ , a na 31 m  $r^2 = 0.95$ . Prikazani rezultati odnose se na najdulju epizodu bure (bura 35, tablica 1) te na sva tri međunivoa.

Iako su za proračun viskozne disipacije izravnom metodom potrebna visokofrekventna mjerenja i u prostoru i u vremenu, vidimo da ona ipak uspijeva uspješno reproducirati oblik krivulje viskozne disipacije. Iz tog je razloga ova metoda odabrana za procjenu disipacije „po komponentama“.

Kako je već prije napomenuto, viskozna disipacija dobijena relacijom (2.11) predstavlja zbroj viskozne disipacije u  $x$ ,  $y$ , i  $z$  smjeru koje se javljaju u pojedinim komponentama prognostičke jednadžbe za varijance (2.5). Inercijskom metodom moguće je odrediti ukupnu disipaciju, ali nam ona ne daje nikakav uvid u raspodjelu disipacije po komponentama i zato ova metoda nije adekvatna za analizu pojedinih članova prognostičke jednadžbe za varijance (2.5). Iz tog razloga, uz pomoć (2.12), izravnim su putem određene pojedine komponente viskozne disipacije,  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$  i  $\varepsilon_z$ . Međutim, korištenjem ove metode dobijene vrijednosti  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$  i  $\varepsilon_z$  očekivano poprimaju premale vrijednosti.

Kako se izravna metoda pokazala neuspješnom u reprodukciji vrijednosti same disipacije, ali uspješnom u reprodukciji oblika krivulje, rezultati izravne metode korišteni su u svrhu određivanja međusobnog odnosa između  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$  i  $\varepsilon_z$ . Nakon utvrđivanja međusobnog odnosa između pojedinih komponenata, korišteni su rezultati dobijeni inercijskom metodom u svrhu određivanja vrijednosti viskozne disipacije po komponentama.

Dakle, određeni su omjeri između  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$ ,  $\varepsilon_z$  i  $\varepsilon_{EQ}$ . Bitno je istaknuti da su spomenuti omjeri određeni za svaki 30-min interval i za sva tri međunivoa, a pripadni srednjaci dani su u tablici 2. Vidimo da disipacija u  $x$  smjeru,  $\varepsilon_x$ , nosi najveći (71%), a disipacija u  $z$  smjeru,  $\varepsilon_z$ , najmanji (4%) udio ukupne viskozne disipacije,  $\varepsilon_{EQ}$ . Ovo je i očekivano jer se nalazimo u koordinatnom sustavu poravnatom sa smjerom srednjeg vjetra.

Tablica 2: Srednjaci omjera komponenata viskozne disipacije i ukupne viskozne disipacije.

omjer	vrijednost
$\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_{EQ}}$	0,71
$\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_{EQ}}$	0,25
$\frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_{EQ}}$	0,04

Nakon toga je viskozna disipacija  $\varepsilon_{IDM}$  množena dobijenim omjerima. Na taj su način dobijeni vremenski nizovi viskozne disipacije po komponentama. Vremenski nizovi za najdulju epizodu bure (bura 35, tabilca 1) prikazani su zajedno s vremenskim nizovima ostalih članova prognostičke jednadžbe za varijance turbulencije (2.5) na slici 12.

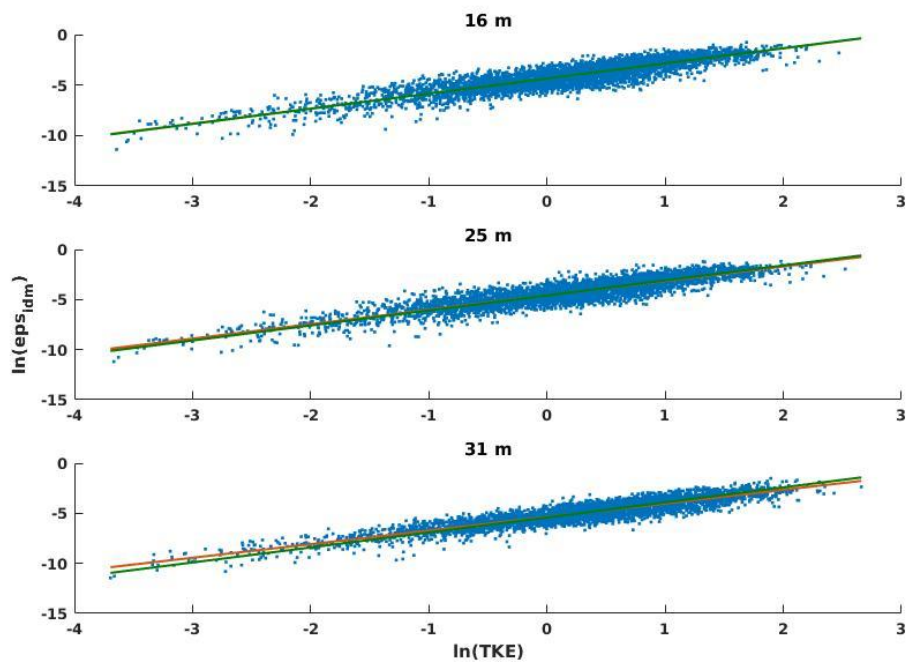
#### 4.5 TKE i viskozna disipacija

Na kraju je promatrana veza između TKE i  $\varepsilon_{IDM}$ . Proračun TKE i viskozne disipacije omogućuje određivanje integralne skale  $\Lambda$ . Korištena je eksponencijalna forma ovisnosti TKE i  $\varepsilon$  (2.13) formulirana na sljedeći način:

$$y = bx^a, \quad (4.3)$$

gdje je  $y = \varepsilon$ ,  $x = TKE$ ,  $b = 1/\Lambda$  i  $a = 1,5$ , slično kao u Večenaj i sur., 2010. Provedena je linearna regresija između  $\varepsilon$  i  $TKE$  za svaki 30-min interval i svaku epizodu bure. Također, provedena je i linearna regresija s unaprijed zadanim koeficijentom smjera,  $a_{teor} = 1,5$ , pomoću koje je određena integralna skala duljine  $\Lambda$ . Određivanje integralne skale duljine pomoću linearne regresije iz samih podataka, bez unaprijed zadanog koeficijenta  $a_{teor} = 1,5$  ne bi imalo smisla jer u tom slučaju nije zadovoljena dimenzionalna analiza. Rezultati su prikazani na slici 11, a vrijednosti dobijenih koeficijenata dane su u tablici 3. Integralna skala duljine određena je metodom najmanjih kvadrata na način da vrijedi:

$$\Lambda = [\exp(\overline{\ln\varepsilon - 1,5\ln TKE})]^{-1}. \quad (4.4)$$



Slika 11: Dijagram raspršenja između viskozne disipacije dobijene inercijskom metodom i TKE za sve epizode bure. Zelenom bojom označen je pravac dobijen linearnom regresijom izravno iz podataka. Smeđom bojom označen je pravac dobijen linearnom regresijom s unaprijed zadanim koeficijentom smjera,  $a = 1,5$ .

Tablica 3: Koeficijenti (4.3) dobijeni linearnom regresijom između viskozne disipacije dobijene inercijskom metodom i TKE. Koeficijent smjera pravca označen je sa  $a$ , odsječak na y osi sa  $b$ , a  $\Lambda$  predstavlja pripadnu integralnu skalu duljine.

	16 m	25 m	31 m
$a$	1,49	1,44	1,36
$b$	-4,35	-4,58	-5,37
$a_{teor}$	1,5	1,5	1,5
$b_{teor}$	-4,35	-4,59	-5,41
$\Lambda$ [m]	$78 \pm 4$	$98 \pm 4$	$224 \pm 4$

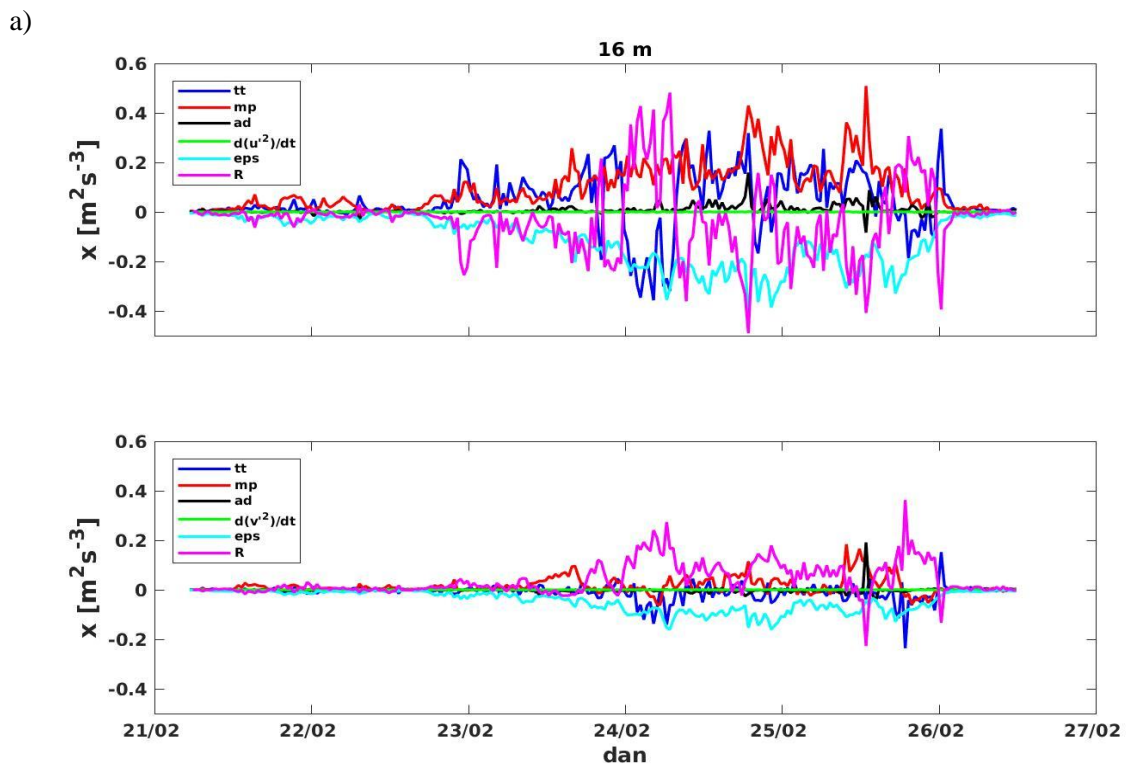
Vidimo da koeficijenti smjera pravca dobijeni linearnom regresijom izravno iz podataka relativno malo odstupaju od teorijske vrijednosti. Međutim, odstupanje je nešto veće za koeficijent smjera na 31 m. Relativno mala odstupanja ukazuju na uspješan proračun

viskozne disipacije inercijskom metodom. Vrijednosti dobijene za integralnu skalu duljine pokazuju da turbulentni vrtlozi rastu s visinom ( $\Lambda$  visinom raste).

Ista analiza provedena je i za viskoznu disipaciju dobijenu linearnom regresijom,  $\varepsilon_{LIN}$ . Dobijeni rezultati slični su prethodno diskutiranim te stoga ovdje nisu prikazani. Pritom je bitno napomenuti da su negativne vrijednosti  $\varepsilon_{LIM}$  izbačene iz analize; linearna regresija zahtijeva logaritmiranje vrijednosti disipacije, a logaritam za negativne vrijednosti nije dobro definiran.

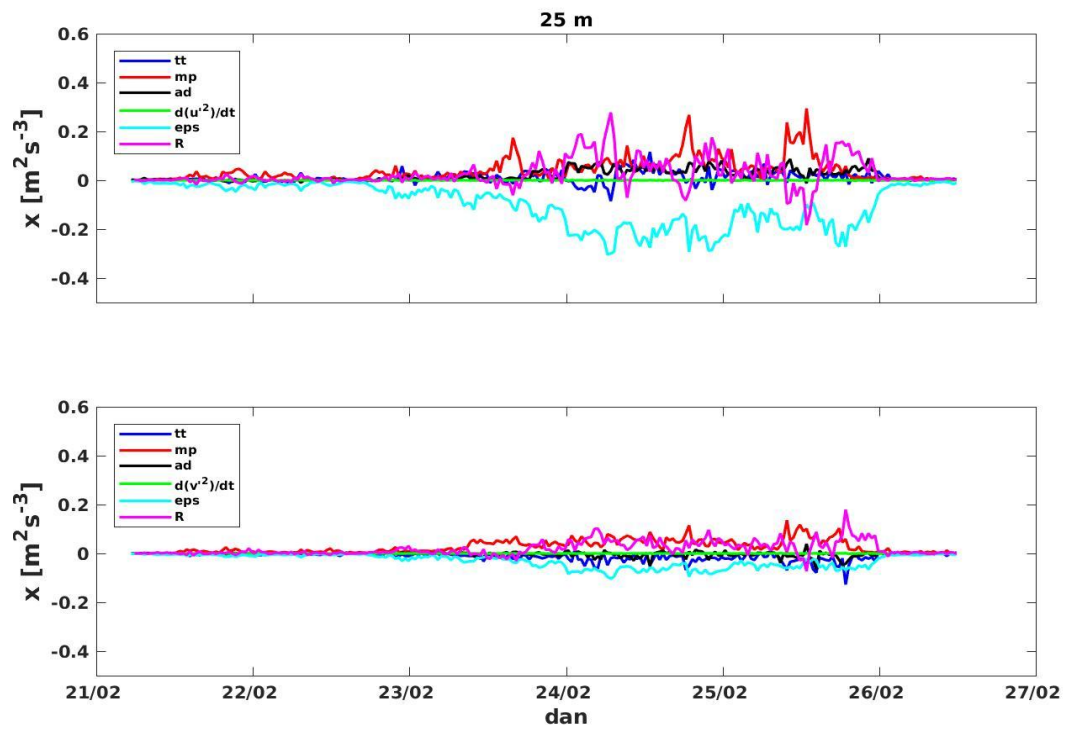
#### 4.6 Vremenski nizovi članova prognostičkih jednadžbi za varijance

Nakon što je određena viskozna disipacija po komponentama, omogućena je detaljna analiza vremenskih nizova članova prognostičkih jednadžbi za varijance (2.5). U okviru ovog rada prikazani su samo vremenski nizovi dobijeni za najdulju epizodu bure (bura 35, tablica 1). Vremenski nizovi prikazani su na slici 12.

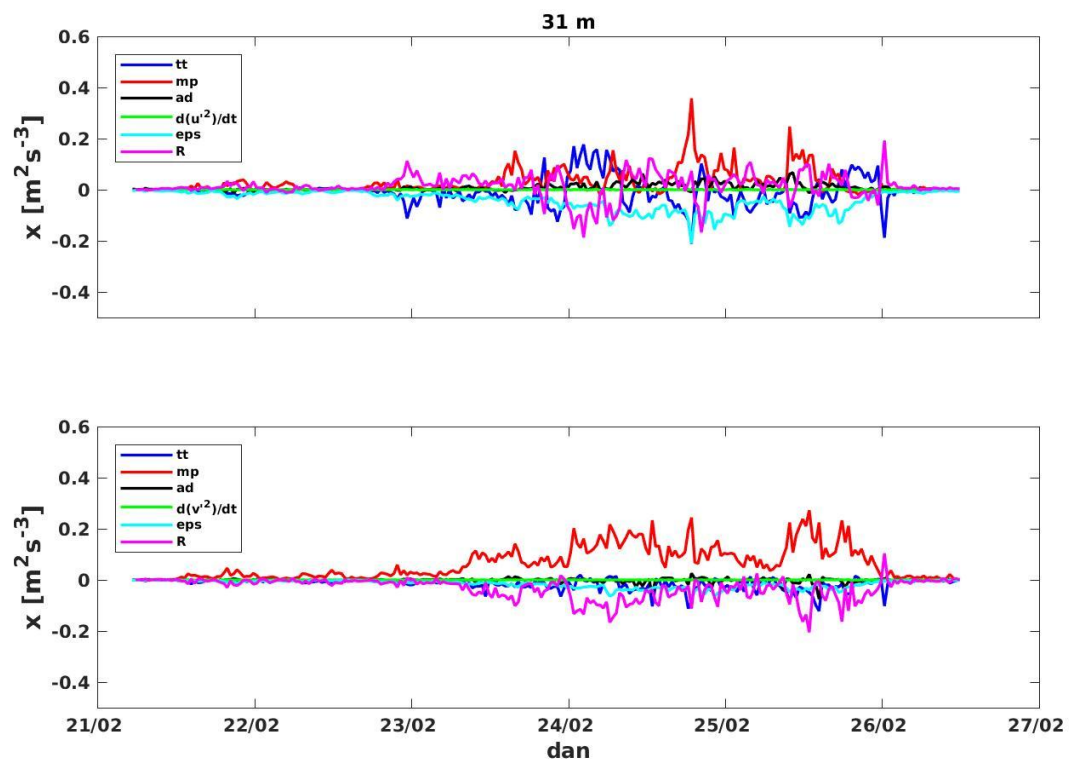


Slika 12: Vremenski nizovi svih članova prognostičke jednadžbe za varijance (2.5) na svim promatranim međunivima: (a) 16 m, (b) 25 m, (c) 31 m. Za svaki međunivo gornji graf prikazuje longitudinalne, ( $x$  komponenta jednadžbe) a donji graf transverzne članove ( $y$  komponenta jednadžbe). Članovi su označeni redom: tamno plava boja odgovara članu turbulentnog transporta, crvena mehaničkoj produkciji, crno je advekcija varijance srednjim vjetrom, zelena boja prikazuje lokalnu promjenu varijance, svijetlo plava boja odgovara viskoznoj disipaciji i konačno, rozom bojom prikazan je rezidualni član. Prikazani vremenski nizovi odgovaraju najduljoj epizodi bure (bura 35, tablica 1).

b)



c)



Slika 12: Nastavak.



Vidimo da su vrijednosti svih članova (2.5) na najnižem nivou, 16 m najveće. Općenito možemo zaključiti da su vrijednosti članova  $x$  komponente jednadžbe veće od vrijednosti članova  $y$  komponente jednadžbe. Ovo se slaže s očekivanjima jer je analiza provedena u koordinatnom sustavu poravnatom sa smjerom srednjeg vjetra pa je većina energije sadržana u longitudinalnoj komponenti. Nadalje, vidljivo je da su dominantni članovi upravo mehanička produkcija, disipacija i rezidualni član što se slaže s prijašnjim istraživanjima (npr. Babić, 2013). Međutim, provedena analiza pokazuje da su vrijednosti koje poprima član turbulentnog transporta (TT) usporedive s dominantnim članovima. Čak štoviše, u nekim slučajevima, TT može biti i veći po apsolutnoj vrijednosti od navedenih dominantnih članova. Bitno je istaknuti i da TT može poprimiti i pozitivne i negativne vrijednosti. Do promjene predznaka naročito dolazi na 16 m. S druge strane su vertikalna advekcija varijance srednjim vjetrom i lokalna promjena varijance zanemarive. Zanimljivo je primijetiti da su TT i rezidualni član uvijek suprotnog predznaka te da TT prati promjene rezidualnog člana (zbroy svih članova koji nisu mogli biti izravno određeni).

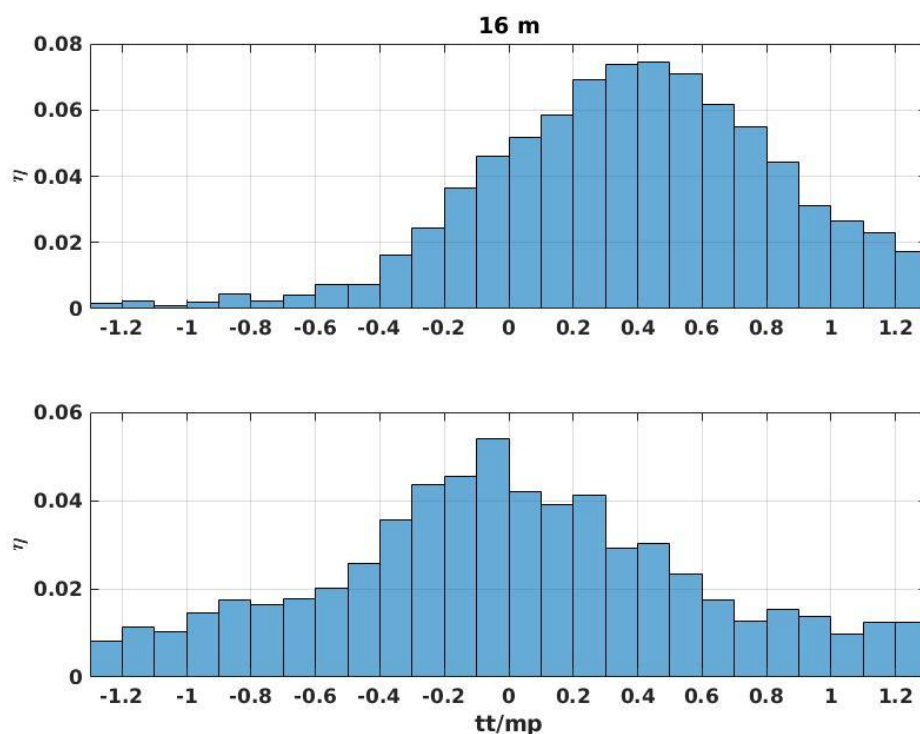
#### ***4.7 Odnos turbulentnog transporta i mehaničke produkcije***

Dalje je proučavana veza između turbulentnog transporta i dominantnih članova. Za analizu je odabrana mehanička produkcija (MP). Prvi i očiti razlog je taj da je MP jedan od dominantnih članova, a drugi razlog leži u činjenici da je ona, u pravilu, uvijek pozitivna. Na slici 13 prikazani su histogrami omjera TT i MP za sve nivoe i obje komponente jednadžbe. Kako je MP uvijek pozitivna, pozitivan omjer ukazuje na pozitivan TT i obrnuto. Vidimo da je TT u  $x$  smjeru najčešće pozitivan na nivou od 16 i 25 m, dok je na nivou od 31 m negativan. Pripadne vrijednosti medijana dane su u tablici 4. S druge strane, TT u  $y$  smjeru najčešće poprima negativne vrijednosti, iako postoje slučajevi u kojima TT može poprimiti drugačiji predznak od ovdje opisanog. Isto tako, bitno je uočiti da u nekim slučajevima TT poprima vrijednosti koje su usporedive ili čak i veće od MP-a.

Pozitivan TT pokazuje da varijanca biva transportirana na promatrani nivo, i obrnuto, negativan TT pokazuje da varijanca biva transportirana dalje od promatranog nivoa.

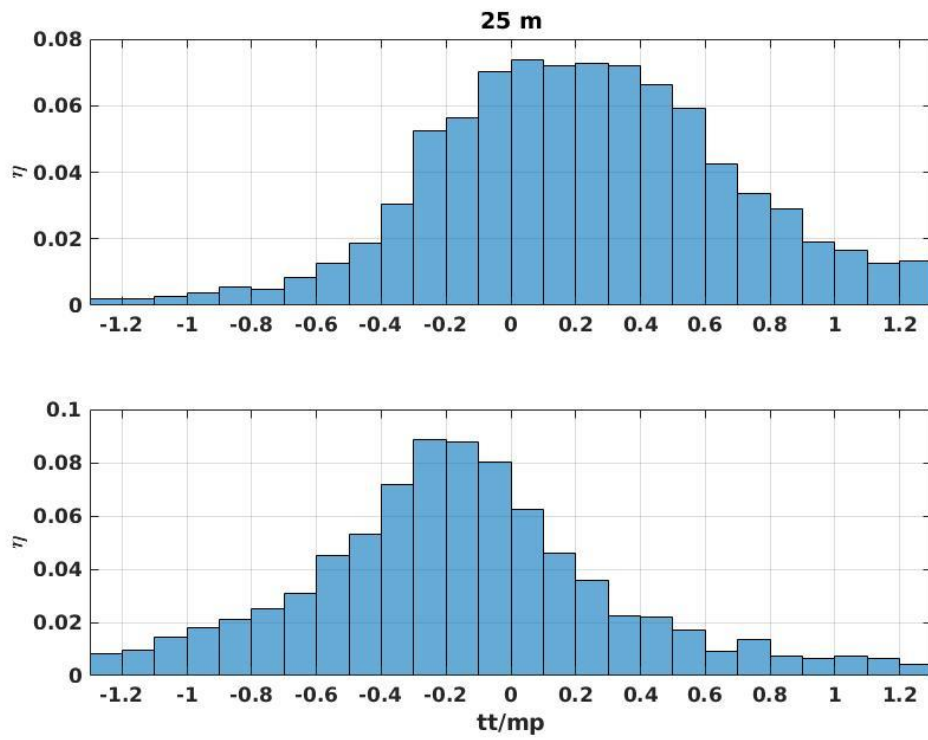
Dakle, možemo zaključiti da  $x$  komponenta varijance najčešće biva transportirana s viših prema nižim nivoima.

a)

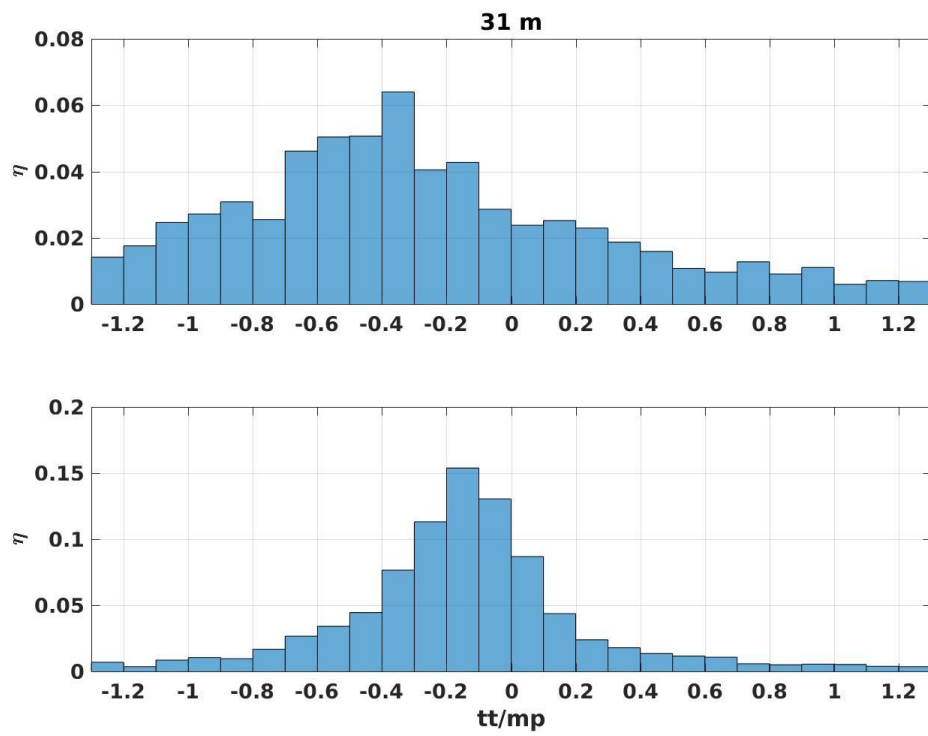


Slika 13: Histogrami omjera turbulentnog transporta i mehaničke produkcije na redom: (a) 16 m, (b) 25 m i (c) 31 m. Za svaki međunivo gornji histogram odnosi se na longitudinalni  $x$  smjer, a donji na transverzalni  $y$  smjer. Vrijednosti medijana za pojedini histogram dane su u tablici 4.

b)



c)



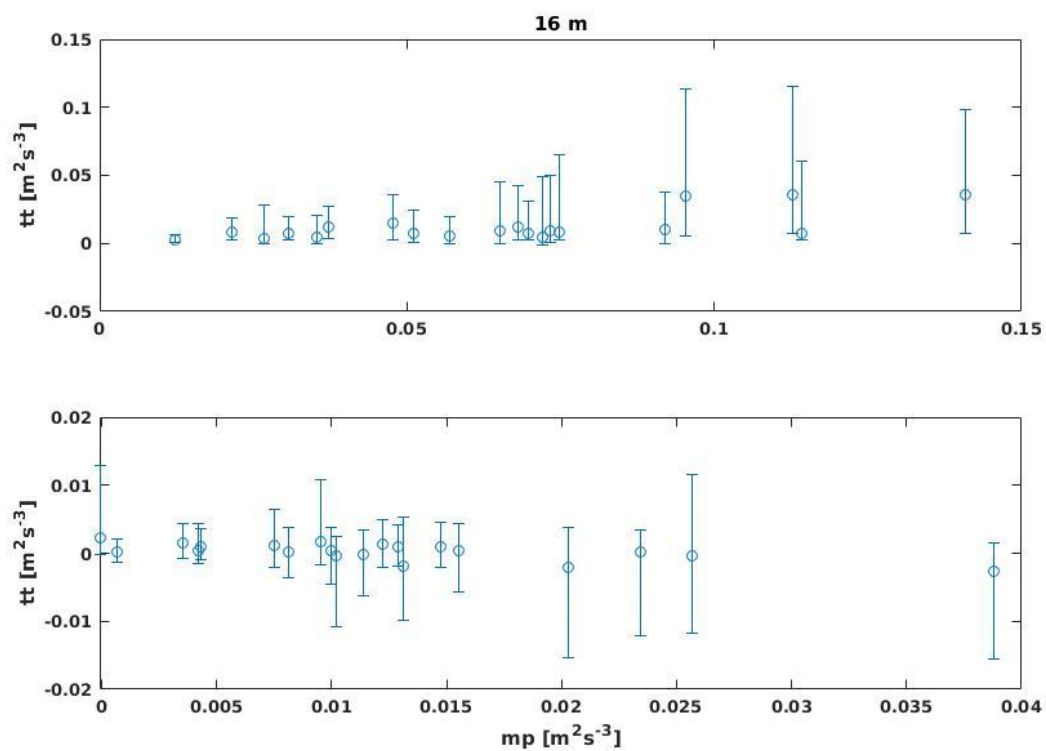
Slika 13: Nastavak.

Tablica 4: Medijani dobijenih omjera TT i MP.

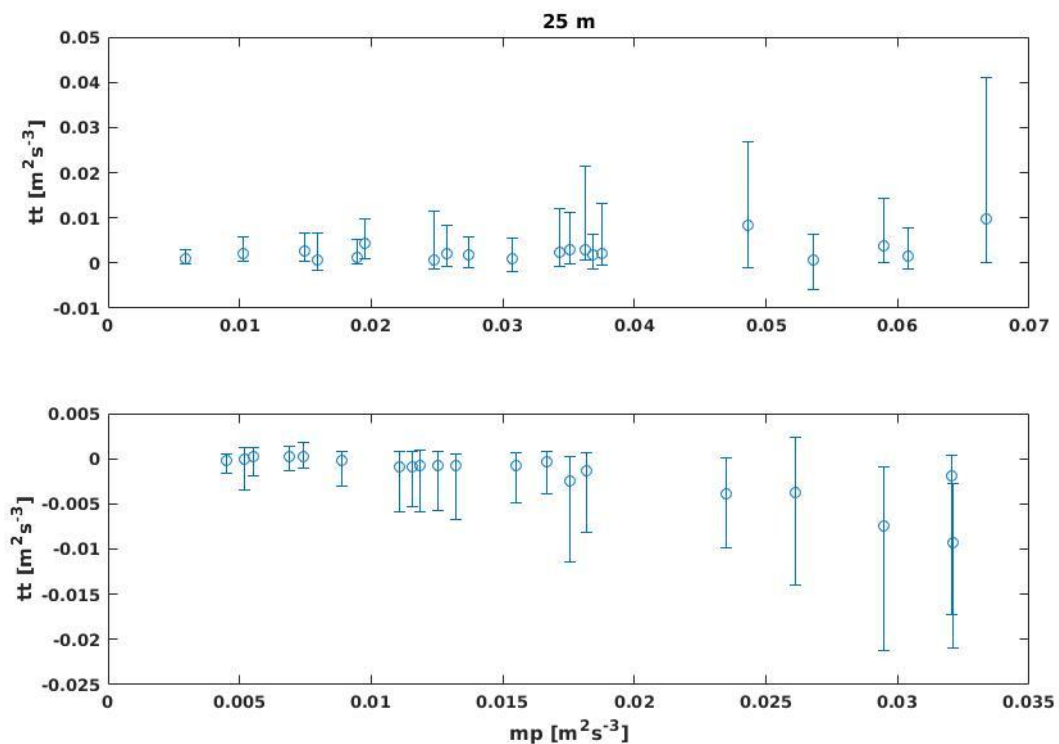
<b>Nivo [m]</b>	<b>Smjer</b>	<b>Medijan</b>
<b>16</b>	<i>x</i>	0,49
	<i>y</i>	0,01
<b>25</b>	<i>x</i>	0,28
	<i>y</i>	-0,18
<b>31</b>	<i>x</i>	-0,37
	<i>y</i>	-0,15

Na slici 14 prikazana je ovisnost medijana i kvartila TT-a o vrijednostima MP-a. Medijan i kvartili dobijeni su tako da su sve vrijednosti TT-a podijeljene u blokove na način da svaki blok sadržava 5% podataka ( $\approx 190$  podataka). Ovim postupkom sačuvana je statistička signifikantnost svakog bloka. Nadalje, vidljivo je da veće vrijednosti MP-a u pravilu podrazumijevaju veće vrijednosti TT-a. Možemo zaključiti da su medijani TT-a bliski nuli za relativno male vrijednosti MP-a. Povećanjem MP-a, povećavaju se i same vrijednosti TT-a kao i pripadni interkvartilni rasponi. Ponovno uočavamo promjenu predznaka u TT-u u *x* smjeru, od pozitivnog na nižim nivoima prema negativnom na višim nivoima.

a)

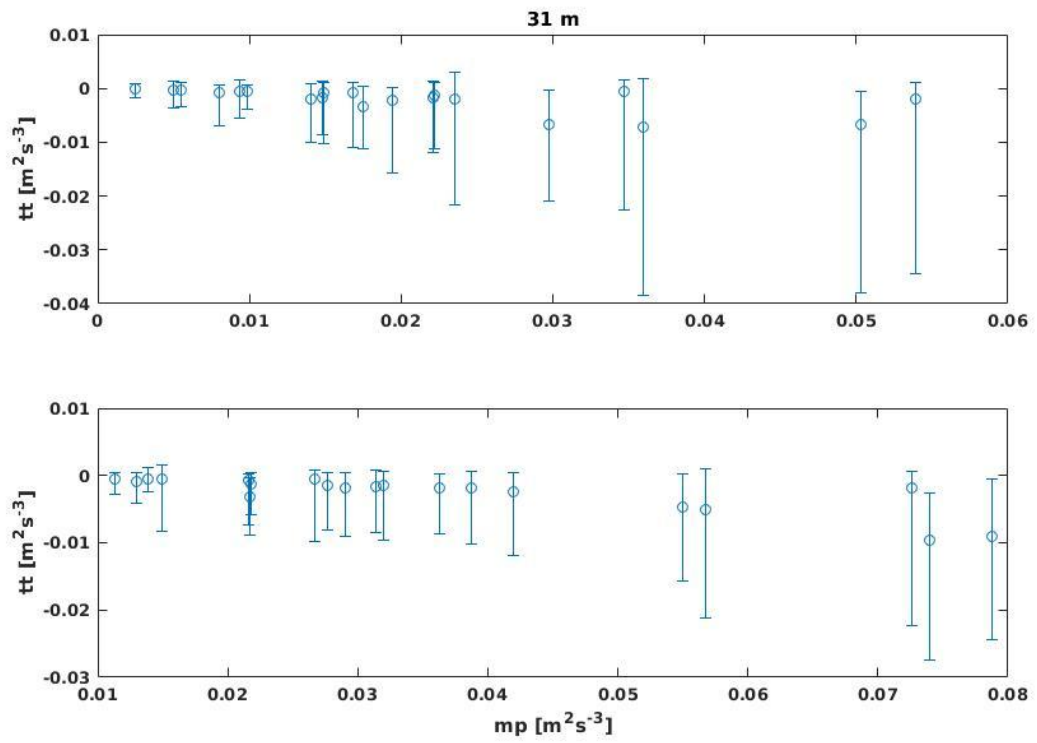


b)



Slika 14: Prikaz medijana i kvartila turbulentnog transporta u ovisnosti o mehaničkoj produkciji na sva tri međunivoa, redom: (a) 16 m, (b) 25 m, (c) 31 m. Za svaki međunivo gornji graf odnosi se na longitudinalni  $x$  smjer, a donji na transverzalni  $y$  smjer.

c)



Slika 14: Nastavak.

Ovime završava analiza članova prognostičkih jednadžbi za varijance turbulencije. U sljedećem poglavlju istaknuti su generalni zaključci ovog rada.

## 5 Zaključak

Ovaj rad bavi se turbulentnim osobinama bure koja nisu bila istraživana do sada. Veći dio jadranske obale pod utjecajem je bure koja utječe na cijeli niz ljudskih aktivnosti (turizam, promet, poljoprivreda, ...). Upravo su iz tog razloga istraživanja bure važna. Neki od glavnih faktora koji sprečavaju ova istraživanja su dakako financijska sredstva potrebna za postavljanje i održavanje mjernih instrumenata, ali i nedostupnost i kompleksnost terena na kojem se ova pojava očituje.

U zadnjih desetak godina provedeno je nekoliko istraživanja mikroskalnih karakteristika bure koja su svakako dovela do boljeg razumijevanja njenih turbulentnih obilježja. Ovaj rad predstavlja svojevrsan nastavak istraživanja mikroskalnih obilježja ove pojave. Pripadni preliminarni rezultati dani su u Malečić i sur. (2018).

U radu su korišteni podaci prikupljeni s Pometenog brda koje se nalazi u zaleđu Splita. Mjerenja su vršena od travnja 2010. do lipnja 2011. godine na tri visine, 10, 22 i 40 m iznad tla. Mjerene su tri komponente brzine vjetera i sonična temperatura frekvencijom uzorkovanja 5 Hz. Tijekom navedenog razdoblja izdvojeno je 60 epizoda bure. Za proučavanje turbulentnih svojstava ovog strujanja potrebno je odrediti vremensku skalu usrednjavanja. Vremenska skala usrednjavanja određena je spektralnom analizom te iznosi 15 min.

Glavni cilj ovog rada bio je, po prvi put, analizirati triplet kovarijance turbulencije za buru. U tu su svrhu analizirani članovi prognostičke jednadžbe za varijance turbulencije. Detaljna analiza povedena je na članu viskozne disipacije. Viskozna disipacija određena je na dva načina: (i) standardnom inercijskom metodom, i po prvi put (ii) direktnom metodom iz prognostičkih jednadžbi za varijance turbulencije. Iako direktna metoda zahtijeva mjerenja s puno većom i prostornom i vremenskom frekvencijom, pokazala se uspješnom u smislu da može reproducirati oblik krivulje viskozne disipacije. Međutim, vrijednosti dobijene direktnom metodom su za nekoliko redova veličine manje. Nadalje,

dobijena je linearna veza između disipacije određenim ovim dvjema metodama. Uz pomoć rezultata dobijenih direktnom metodom procijenjena je viskozna disipacija u longitudinalnom, transverzalnom i vertikalnom smjeru puhanja bure. Pokazalo se da viskozna disipacija najveći utjecaj ima upravo u longitudinalnom smjeru.

Promatrana je i veza kinetičke energije turbulencije i disipacije dobijene inercijskom metodom. Dobijen je uvid u njihov parametrizacijski odnos koji se koristi u numeričkim modelima. U tu svrhu određena je empirijska skala karakteristične duljine turbulentnih vrtloga koja je pokazala da turbulentni vrtlozi rastu s visinom.

Nadalje, posebni naglasak bio je na analizi člana turbulentnog transporta, člana koji sadrži triplet kovarijancu. Pokazalo se da je turbulentni transport značajan po intenzitetu za buru; procjena tog člana jedan je od glavnih ciljeva ovog rada. On može poprimiti i pozitivne i negativne vrijednosti. Turbulentni transport u longitudinalnom smjeru strujanja na višim je nivoima negativan, dok je na nižima pozitivan. Drugim riječima, turbulentni transport na višim nivoima odvodi turbulentnu varijancu, a dovodi je na nižim nivoima.

Zaključno, pokazalo se da triplet kovarijance imaju bitnu ulogu u turbulentnim svojstvima bure. Za potpuniji opis turbulentnih tokova trećeg reda bilo bi potrebno postaviti veći broj mjernih instrumenata, i u horizontalnom, i u vertikalnom smjeru. Na taj način osim detaljnije vertikalne slike, dobili bismo i uvid u karakteristike horizontalne turbulencije. Budući da je ovo prvi rad koji analizira triplet kovarijance, bilo bi dobro da se ovakva analiza provede i na drugim lokacijama koje su pod utjecajem ovog strujanja. Također, bilo bi zanimljivo proučiti turbulentne tokove trećeg reda i na drugim strujanjima osim bure.



## Literatura

Babić, N., 2013: Proučavanje turbulentnih tokova bure u navjetrini Splita. Diplomski rad, Geofizčki odsjek PMF-a: 52 str.

Babić, N., Večenaj, Ž., Kozmar, H., Horvath, K. i Grisogono, B., 2016: On turbulent fluxes during strong winter bora events. *Boundary-Layer Meteorol.*, **158**, 331-350.

Bajić, A., 1911: Application of the two-layer hydraulic theory on the severe northern Adriatic bora. *Meteorologische Rundschau*, **44**, 129-133.

Belušić, D., Klaić, Z., B., 2006: Mesoscale dynamics, structure and predictability of a severe Adriatic bora case. *Meteorol. Z.*, **15(2)**, 157-168.

Belušić D., Žagar M., Grisogono B., 2007: Numerical simulation of pulsations in the bora wind. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **133**, 1371–1388.

Enger L, Grisogono B., 1998: The response of bora-type flow to sea surface temperature. . *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **124**, 1227–1244.

Gohm, A., Mayr, G. J., Fix, A., Giez, A., 2008: On the onset of bora and the formation of rotors and jumps near a mountain gap. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **134**, 21-46.

Grisogono, B., Belušić, D., 2009a: A review of recent advances in understanding the meso- and micro-scale properties of the severe bora wind. *Tellus*, **61A**, 1-16.

Grisogono, B., Belušić, D., 2009b: Uvod u mezoskalnu meteorologiju i atmosfersku turbulenciju. Interna skripta, 138 str.

Grubišić V., 2004: Bora-driven potential vorticity banners over the Adriatic. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **130**, 2571–2603.

Horvath K., Ivatek-Šahdan S., Ivančan-Picek B., Grubišić V., 2009: Evolution and structure of two severe cyclonic bora events: Contrast between the northern and southern Adriatic. *Weather Forecast*, **24**, 946–964.

Jiang QF., Doyle JD., 2005: Wave breaking induced surface wakes and jets observed during a bora event. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L17807.

Jurčec, V., 1981: On mesoscale characteristics of bora conditions in Yugoslavia. *Pure Appl. Geophys.*, **119**, 215-227.

Kaimal, J. C. i Finnigan, J. J., 1994: *Atmospheric Boundary Layer Flows. Their Structure and Measurement*, Oxford University Press, Oxford, 304 str.

Klaić ZB., Belušić D., Grubišić V., Gabela L., Ćoso L., 2003: Mesoscale airflow structure over the northern Croatian coast during MAP IOP 15—a major bora event. *Geofizika*, **20**, 23–61.

Klemp J., Durran D., 1987: Numerical modelling of bora winds. *Meteorol. Atmos. Phys.*, **36(1-4)**, 215-227.

Lepri, P., Kozmar, H., Večenaj, Ž., Grisogono B. 2014: A summertime near-ground velocity profile of the bora wind. *Win. Struc.*, **19(5)**, 505-522.

Lepri, P., Večenaj, Ž., Kozmar, H., Grisogono B., 2015: Near-ground turbulence of the bora wind in summertime. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, **147**, 345-357.

Lepri, P., Kozmar, H., Večenaj, Ž., Grisogono B. 2017: Bora wind characteristics for engineering applications. *Win. Struc.*, **24(6)**, 579-611.

Malečić, B., Večenaj, Ž., Grisogono, B. 2018: Estimation of turbulence triplet covariances. Prezentacija. *Meteorol. Challenges*, Zagreb, Hrvatska, 15.-16. studeni 2018.

Orlić, M., Kuzmić, M., Pasarić, Z., 1994: Response of the Adriatic Sea to the bora and sirocco forcing. *Cont. Shelf Res.*, **14**, 91-116.

Smith, R.B., 1987: Aerial observation of the Yugoslavian bora. *J. Atmos. Sci.*, **44**, 269-297.

Stull, R.B., 1988: *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Nizozemska, 666 str.

Tennekes, H. i Lumely, J., 1972: *A First Course in Turbulence*. MIT Press, Cambridge, 300 str.

Večenaj, Ž., Belušić, D., Grisogono, B., 2010: Characteristics of the near-surface turbulence during a bora event. *Ann. Geophys.*, **28**, 155-163.

Večenaj, Ž., 2010: Characteristics of the bora related turbulence. Doktorska disertacija, Geofizički odsjek PMF-a: 83 str.

Večenaj, Ž., Belušić, D., Grubišić, V., Grisogono, B., 2012: Along coast features of the bora related turbulence. *Boundary-Layer Meteorol.*, **143**, 527-545.