

# Prva analiza mikroskalnih karakteristika juga

---

Zajec, Anamarija

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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:217:159565>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-27**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
GEOFIZIČKI ODSJEK

Anamarija Zajec

PRVA ANALIZA MIKROSKALNIH  
KARAKTERISTIKA JUGA

Diplomski rad

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
GEOFIZIČKI ODSJEK

DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ FIZIKA-GEOFIZIKA

SMJER: METEOROLOGIJA I FIZIČKA OCEANOLOGIJA

Anamarija Zajec

Diplomski rad

**Prva analiza mikroskalnih  
karakteristika juga**

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

Zagreb, veljača 2022.

*Prvo bih se zahvalila doc. dr. sc. Željku Večenaju na mentorstvu i pomoći pri izradi ovog rada. Također bih htjela zahvaliti mojoj obitelji i prijateljima na podršci kroz cijeli studij.*

# Sažetak

Jugo je karakterističan vjetar na Jadranskom moru koji puše iz smjera jugoistoka do juga. Razlikuju se ciklonalno i anticiklonalno jugo. Oni često uzrokuju visoke valove koji mogu ometati promet te u biometeorološkom smislu nepovoljno utjecati na neke ljude.

Podaci korišteni u radu su mjereni na tornju blizu Masleničkog mosta frekvencijom uzrokovanja od 10 Hz. Promatrana epizoda juga trajala je  $\approx 34$  sata s početkom 02. listopada 2020. godine u 13:18 sati.

Cilj ovog rada je odrediti po prvi puta mikroskalne karakteristike juga, TKE i njenu disipaciju  $\varepsilon$ . Određena je skala usrednjavanja turbulencije, a viskozna disipacija je procijenjena koristeći metodu inercijalne disipacije. Provjereno je teorijsko slaganje  $-5/3$  pravca u log-log ovisnosti spektra o frekvenciji. Izračunata je empirijska skala duljine koja se može koristiti u numeričkim modelima za parametrizaciju. Provjereno je slaganje teorijske relacije odnosa TKE i  $\varepsilon$ . Pokazano je da se jugo dobro slaže s tom teorijskom relacijom.

**Ključne riječi:** jugo, kinetička energija turbulencije, viskozna disipacija

# First analysis of the jugo wind microscale properties

## Abstract

Jugo is a characteristic Southern or Southeastern wind at the Adriatic sea. There are cyclonic and anticyclonic jugo winds. They often cause high waves which can impact traffic and can also adversely affect some people in biometeorological meaning.

The data used in this paper was obtained from the tower near the Maslenica bridge with the sampling frequency of 10 Hz. The observed episode of jugo wind lasted  $\approx 34$  hours starting October 2nd of 2020 at 1:18 pm.

The goal of this study is to determine for the first time the microscale characteristics of the jugo wind, TKE and its dissipation rate  $\varepsilon$ . The turbulence averaging scale was determined and viscous dissipation was estimated using the inertial dissipation method. The theoretical agreement of the  $-5/3$  slope in log-log dependence of the spectrum and frequency was tested. An empirical length scale which can be used in numerical model parametrization was calculated. The agreement of the theoretical relation between TKE and  $\varepsilon$  was checked. The jugo wind has shown to agree well with the theoretical relation.

**Keywords:** jugo wind, turbulence kinetic energy, dissipation rate

## Sadržaj

Popis kratica.....	7
1. Uvod.....	1
1.1 Jugo.....	2
1.2 Dosadašnja istraživanja mikroskalnih karakteristika vjetra u sklopu GFO- a PMF-a .....	3
1.3 Motivacija i cilj istraživanja .....	4
2. Teorijska pozadina .....	5
2.1 Reynoldsovo usrednjavanje .....	5
2.2 Prognoistička jednadžba TKE .....	5
2.3 Kinetička energija turbulencije i viskozna disipacija .....	7
2.4 Fourierov spektar .....	8
3. Podaci i metode .....	11
3.1 Mjerna postaja .....	11
3.2 Opis sinoptičke situacije .....	12
3.3 Podaci.....	15
4. Rezultati i diskusija.....	16
4.1 Priprema podataka .....	16
4.2 Spektri snage brzina .....	18
4.3 Prilagodba -5/3 pravca na log-log spektar .....	20
4.4 Vremenski niz TKE i $\epsilon$ .....	21
4.5 Odnos TKE i $\epsilon$ .....	22
5. Zaključak .....	24
Literatura.....	26

# Popis kratica

$a, b$	koeficijenti linearne prilagodbe
$a_t, b_t$	teorijski koeficijenti linearne prilagodbe
$f$	frekvencija
$i$	pozitivni cijeli broj
$k$	valni broj
$S_i$	Fourierov spektar bilo koje komponente vjetra
$TKE$	turbulentna kinetička energija
$\bar{u}$	srednja longitudinalna brzina vjetra
$u$	longitudinalna komponenta brzine vjetra
$v$	lateralna komponenta brzine vjetra
$w$	vertikalna komponenta brzine vjetra
$u', v', w'$	turbulentne fluktuacije longitudinalne, lateralne i vertikalne komponente brzine vjetra
$x, y$	kartezijeve koordinate
$\partial$	parcijalni diferencijal
$\varepsilon$	viskozna disipacija
$\theta$	potencijalna temperatra
$\Lambda$	empirijska skala duljine



# 1. Uvod

Na istočnoj obali Jadrana postoje različiti tipovi vjetra od kojih se najviše ističu bura i jugo. Složena orografska konfiguracija doprinosi čestoj pojavi olujnih vjetrova na tom području zbog čega su oni predmet brojnih istraživanja. Dok je bura intenzivno istraživana desetljećima, jugu se nije posvećivala tolika pažnja. Jugo je vjetar jugoistočnog smjera. Razlikuju se ciklonalno i anticiklonalno jugo. Ciklonalno jugo najčešće donosi oborinu i visoku vlagu, dok anticiklonalno jugo donosi sunčano vrijeme ili vrijeme s malom naoblakom bez vrućine. Jugo uzrokuje velike valove koji mogu utjecati na pomorski promet i ljude.

U ovom radu će se po prvi puta analizirati mikroskalne karakteristike juga. Do sada su u sklopu Geofizičkog odsjeka (GFO) Prirodoslovno-matematičkog fakulteta (PMF) u Zagrebu one proučavane samo za buru. Proučavanja turbulencije juga bitno je jer na toj skali se odvijaju važni procesi prijenosa vlage, impulsa i topline u atmosferskom graničnom sloju u sklopu interakcije strujanja zraka s tlom. Također, jugo može kao i bura, doseći olujne i orkanske brzine te stvarati probleme u ljudskim djelatnostima poput prometa, turizma, infrastrukture, građevinarstva, poljoprivrede i ribarstva.

U ovom radu će biti proučena epizoda juga koja je mjerena u blizini Masleničkog mosta, a trajala je  $\geq 34$  h. Prikazat će se Fourierov spektar brzina u kojem se očekuje energijski minimum (procjep) između mikroskale i sinoptičke skale. Odredit će se skala usrednjavanja pomoću koje će se epizoda juga podijeliti na blokove podataka na kojima će se moći odrediti kinetička energija turbulencije (TKE) i njena viskozna disipacija ( $\epsilon$ ) tzv. metodom inercijalne disipacije (npr. Večenaj, 2012). Na log-log prikazima spektara brzine provjeriti ćemo slaganje istih s pravcem koeficijenta smjera  $-5/3$ . Na taj način će se odrediti produžetak inercijalnog područja na određenim frekvencijama gdje je opravdano procjenjivanje  $\epsilon$ -a. Provjerit će se odnos TKE i  $\epsilon$  te njegovo slaganje sa parametrizacijskom relacijom koja se koristi u numeričkim modelima.

Rad je koncipiran na način da je u 2. poglavlju prikazan teorijski dio s korištenim jednadžbama, u 3. poglavlju su prikazani podaci i mjerna postaja, 4.

poglavlje sadrži prikaz rezultata, a 5. poglavlje zaključak. No prije toga, u sklopu ovog poglavlja će se reći još nešto više o samom jugu, dosadašnjim istraživanjima turbulencije na GFO-u PMF-a te o samom cilju ovog rada.

## *1.1 Jugo*

U ovom poglavlju sažimamo informacije o jugu iz rada Večenaj (2005). Jugo je vjetar uvjetovan općim strujanjem nastalim zbog ciklone nad Jadranom ili zbog Genovske ciklone. Ponekad može biti dio strujanja koje dolazi iz Afrike (vjetar sirocco) , ali u takvim situacijama puše nad širem području Sredozemlja. Sinoptičke situacije poput ciklogeneze u zavjetrini Alpa i pojave ciklone u sjevernoj i srednjoj Europi uzrokuju pojavu juga. Jugo puše iz smjera juga na otvorenom moru dok bliže kopnu skreće pa puše iz smjera jugistoka. To je topao i vlažan vjetar koji često donosi oborinu. Zimi je jači nego ljeti. Na sjevernom Jadranu se javlja najčešće od kraja zime do početka ljeta, dok na južnom Jadranu od jeseni do kraja zime. Jugo može biti ciklonalno i anticiklonalno s obzirom na način nastanka.

Ciklonalno jugo nastaje kada se razvije ciklona u Genovskom zaljevu ili na sjevernom Jadranu. Također će se pojaviti ako se ciklona sa zapada približava Jadranu, odnosno putuje prema istoku. Vjetar je jugoistočnog smjera te najčešće okarakteriziran pridjevima umjeren do olujan. Jugo može ponekad puhati i na udare. Jugo može puhati duž cijelog Jadrana ako je staza gibanja ciklone sjevernija od Jadrana. Također, ako ciklona prolazi južnije, srednji Jadran može predstavljati granicu između ciklonalnog juga i ciklonalne bure.

Anticiklonalno jugo nastaje kada se anticiklona nalazi iznad istočnog Sredozemlja i stacionarna ciklona nad sjevernom Europom. Češće se javlja u proljeće i jesen. Najčešće nema oborina, a atmosfera je mutna zbog povećanja čestica prašine koje dolaze iz pustinja sjeverne Afrike.

Važno je spomenuti sljedeća istraživanja juga. Makjanić (1978) ukazuje na veću pojavu juga na srednjem Jadranu. Vukičević (1991) daje čestinu, satne brzine i maksimalne udare za 30-godišnje razdoblje (1961-1990) olujnog juga u Splitu. Poje (1992) pokazuje da je jugo jako u onim obalnim područjima gdje je more otvorenije ili

gdje vjetar puše uzduž kanala. Proučavani su slučajevi juga 2000. – 2004. godine koji su najčešće uzrokovani ciklonama na zapadu Jadranskog mora (npr. Vukičević i sur., 2005).

## *1.2 Dosadašnja istraživanja mikroskalnih karakteristika vjetra u sklopu GFO-a PMF-a*

U ovom radu je prvi put napravljena analiza mikroskalnih karakteristika juga. Do sada je u tom smislu proučavana isključivo bura, njezine mezoskalne i mikroskalne karakteristike. Bura se prije smatrala vjetrom s katabatičkim svojstvima, međutim, taj se princip proučavanja može koristiti samo za slabu buru, ali ne jaku i olujnu (npr. Grisogono i Belušić, 2009). Turbulencija bure nije do kraja istražena jer nedostaju mjerenja koja trebaju biti ekstremno visokofrekventna. Turbulencija je kompleksna matematički zbog nelinearnosti i nezatvorenog sustava jednadžbi koje se parametriziraju u numeričkim modelima. U zavjetrini planina se javlja jaka turbulencija koja može uzrokovati jaka dinamička opterećenja na građevinske konstrukcije (npr. Belušić i sur., 2006, Bajić, 2011). TKE je procijenjena u radu Belušić i Klaić (2006) u Vratniku i Senju te je pokazano da ona može doseći vrlo visoke vrijednosti.

Jedan od članova jednadžbe TKE je viskozna disipacija koja opisuje disipaciju TKE i može se koristiti kao mjera jačine turbulencije što se koristi i za dijagnozu iste u zračnim lukama (npr. Frech, 2007). Spektri turbulencije bure spominju se u Grisogono i Belušić (2009) te Šoljan i sur. (2018).

Određivanje duljine miješanja za parametrizaciju turbulencije u numeričkim modelima proučavano je u više radova, među kojima treba spomenuti rad Grisogona i Belušića (2008).

Večenaj i sur. (2010) su analizirali jednu epizodu bure koristeći mjerenja dobivena 3D ultasoničnim anemometrom s uzorkovanjem od 4 Hz u Senju 2006. godine. Pokazano je da pravac  $-5/3$  prati dobro spektral na nižim frekvencijama. Računali su TKE i njezinu disipaciju pomoću metode inercijalne disipacije. Vrijednosti

TKE dosežu  $20 J kg^{-1}$ . Pokazano je da je  $\varepsilon$  proporcionalan  $s \approx TKE^{1.3}$ , dok je empirijska skala duljine dobivena  $\Lambda \approx 60 m$ . Te informacije će se iskoristiti za usporedbu s jugom u ovom radu.

Večenaj (2012) analizira vremensku i prostornu raspodjelu turbulentnih karakteristika bure. Analizirana su 4 događaja bure. Određena je skala usrednjavanja turbulencije te je procijenjena disipacija TKE pomoću dvije metode: inercijalna disipacijska metoda (koja je korištena i u ovom radu) i strukturna funkcija trećeg reda (npr. Stull, 1988).

### *1.3 Motivacija i cilj istraživanja*

Motivacija za izradu ovog rada dolazi iz proučavanja mikroskalnih karakteristika bure (npr. Večenaj, 2012). U ovom radu će po prvi puta mikroskalne osobine biti proučene za jugo.

Prvi cilj ovog istraživanja je odrediti skalu usrednjavanja turbulencije juga. To je važno kako bi se mogle definirati fluktuacije koje su dobivene kao razlika ukupne veličine i njene srednje vrijednosti. Ona će biti određena pomoću Fourierove spektralne analize. Nakon što se to odredi, podaci će biti podijeljeni na manje blokove pomoću kojih će se izračunati TKE i njezinu disipaciju, što je drugi cilj rada. Pomoću formule parametrizacije odnosa TKE i disipacije izračunat će se empirijska skala duljine, koja predstavlja karakterističnu veličinu vrtloga za jugo, što je konačni cilj ovog rada.

## 2. Teorijska pozadina

### 2.1 Reynoldsovo usrednjavanje

Turbulentno strujanje je pojačano miješanje u fluidu. Karakterizirano je nestacionarnim višeskalnim gibanjem uz dominantne slučajne komponente. Turbulencija se opisuje statistički koristeći Reynoldsovu dekompoziciju. Turbulentna polja možemo napisati kao:

$$A = \bar{A} + A' \quad (1)$$

gdje je  $\bar{A}$  sporo promjenjiva komponenta, a  $A'$  turbulentna komponenta (perturbacija). Srednjaci fluktuacija iščezavaju ( $\overline{A'} = 0$ ) te usrednjavanje umnoška srednjaka i fluktuacija također iščezava ( $\overline{A'A} = 0$ ). Uvid u turbulentna svojstva se dobiva promatranjem turbulentnih varijanci i kovarijanci ( $\overline{A'^2}, \overline{A'B'}$ ).

Reynoldsova dekompozicija može se opravdno raditi samo ako postoji energijski procjep, odnosno granica između mikro- i makroskale na mezoskali koja je vidljiva u Fourierovom spektru.

### 2.2 Prognostička jednadžba TKE

Prognostička jednadžba TKE uz zanemarivanje molekularne difuzije:

$$\frac{\partial TKE}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial TKE}{\partial x_j} = \delta_{i3} \frac{g}{\theta_v} \overline{(u_i' \theta_v')} - \overline{u_i' u_j'} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \frac{\partial (\bar{u}_j' TKE)}{\partial x_j} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial (\bar{u}_i' p')}{\partial x_i} - \nu \overline{\left( \frac{\partial u_i'}{\partial x_j} \right)^2}, \quad (2)$$

I            II            III            IV            V            VI            VII

gdje su članovi:

I = lokalna promjena ili tendencija TKE

II = advekcija TKE srednjim vjetrom

III = uzgonski član produkcije ili gubitka

IV = mehanička produkcija

V = turbulentni transport TKE

VI = transport zbog varijacija kovarijance brzine i tlaka

VII = viskozna disipacija.

Član III., ovisno o tome kakvog je predznaka, predstavlja izvor ili ponor turbulencije. Mehanička produkcija (IV) predstavlja međudjelovanje toka impulsa  $\overline{u_i' u_j'}$  koji je najčešće negativan, a smicanje srednjeg vjetra  $\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}$  je, barem u prosjeku, pozitivno u atmosferskom graničnom sloju. Dakle, IV član predstavlja, s minusom ispred, pozivitan doprinos u (2). V član predstavlja transport energije turbulentnim vrtlozima. VI član je prijenos TKE zbog fluktuacija tlaka i polja strujanja, dok je VII član uvijek ponor jer je on sam pozitivan. VII član je mjera koliko se TKE pretvorilo u unutarnju energiju (toplinu) vršeći rad protiv viskoznog trenja. Ona postaje veća što je veličina vrtloga manja.

Ako se koordinatni sustav postavi u smjeru srednjeg vjetra (što će se i napraviti u ovom radu) i pretpostavi se horizontalnu homogenost te se zanemari subsidencija, prognostičku jednadžbu TKE možemo zapisati:

$$\frac{\partial \overline{TKE}}{\partial t} = \frac{g}{\theta_v} (\overline{w' \theta_v'}) - \overline{u' w'} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} - \frac{\partial (\overline{w' TKE})}{\partial z} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial (\overline{w' p'})}{\partial z} - \varepsilon, \quad (3)$$

gdje sve oznake imaju isto značenje kao i u (2). Zadnji član (viskozna disipacija) postoji uvijek kada je TKE različit od nule. To znači da će turbulencija težiti smanjenju i nestati s vremenom, osim ako nije generirana lokalno ili transportirana pomoću dva člana ispred  $\varepsilon$ .

U ovom radu je fokus na dva člana jednadžbe (3), a to su TKE i  $\varepsilon$ . Ta dva člana intenzivno su istraživani za buru, gdje je njihov međusobni odnos vrlo dobro poznat (npr. Večenaj, 2012). Iako bi se mogli računati i ostali članovi u (3) jer imamo mjerenja na dvije visine iznad tla (5 i 10 m), u ovom radu se ne bavimo time. Naime, anemometar na 5 m postavljen je na aluminijski krak duljine 2 m i usmjeren je u smjer puhanja bure pa korekcija podataka dobivenih anemometrom na 5 m s obzirom na jugo nadilaze mogućnosti, a i potrebe ovog rada.

## 2.3 Kinetička energija turbulencije i viskozna disipacija

Kinetička energija turbulencije je jedna od najvažnijih veličina u mikroskalnoj meteorologiji jer nam govori o intenzitetu turbulencije; po jedinici mase definirana je kao:

$$\overline{TKE} = \frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}), \quad (4)$$

gdje su  $u'^2, v'^2$  i  $w'^2$  kvadrati turbulentnih perturbacija sve tri komponente brzine vjetra podvrgnute Reynoldsovom usrednjavanju.

Viskozna disipacija  $\varepsilon$  opisuje disipaciju TKE u toplinu preko molekularne viskoznosti. Na taj način se guše turbulentni vrtlozi. Ona je definirana kao:

$$\varepsilon = \nu \overline{\left(\frac{\partial u_i'}{\partial x_j}\right)^2}, \quad (5)$$

gdje  $u_i'$  predstavlja perturbirane komponente brzine, a  $x_j$  sve tri komponente koordinatnog sustava (x, y, z). U slučaju horizontalne homogenosti viskozna disipacija je:

$$\varepsilon = \nu \left[ \overline{\left(\frac{\partial u'}{\partial z}\right)^2} + \overline{\left(\frac{\partial v'}{\partial z}\right)^2} + \overline{\left(\frac{\partial w'}{\partial z}\right)^2} \right]. \quad (6)$$

Za određivanje viskozne disipacije na podacima mjerenim ultrasoničnim anemometrom, često se koristi metoda inercijalne disipacije (engl. Inertial dissipation method IDM) (npr. Tennekes i Lumley, 1972). Za korištenje te metode mora vrijediti da je turbulencija lokalno izotropna. Također je potrebno da vrijedi Taylorova hipoteza „zamrznute turbulencije“ koja je potrebna za transformaciju iz vremenske u prostornu domenu. Taylor je predložio da se za neke specijalne slučajeve turbulencija može smatrati „zamrznutom“ dok prolazi pokraj senzora. Taylorova hipoteza (npr. Stull, 1988) :

$$\frac{\sigma_u}{\bar{u}} < 0.5 \quad (7)$$

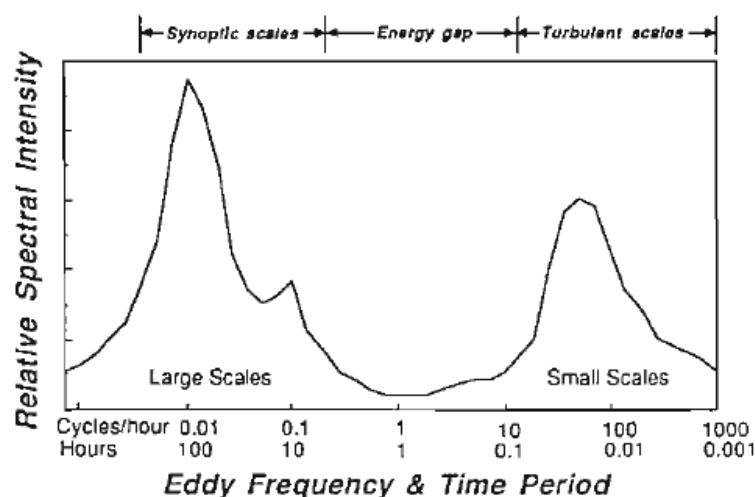
gdje je  $\sigma_u$  standardna devijacija horizontalne komponente vjetra, a  $\bar{u}$  srednja horizontalna brzina vjetra. Taylorova hipoteza je korisna samo kada se turbulentni vrtlozi razvijaju u vremenskoj skali koja je duža od vremena koje je potrebno da

vtlog prođe pored senzora. Također vrijedi i onda kada je intenzitet turbulencije mali u odnosu na srednju brzinu vjetra.

## 2.4 Fourierov spektar

U Fourierovom spektru brzine vjetra se očekuje granica između sinoptičke skale i mikroskale koja je vidljiva kao energijski procjep (eng. energy gap) na mezoskali. Stoga je to jedan od važnih alata za određivanje turbulentne skale usrednjavanja (slika 1). Maksimumi na slici pokazuju koje veličine vrtloga doprinose najviše turbulentnoj kinetičkoj energiji. Lijevi maksimum sa periodom blizu 100 h odgovara varijacijama brzine vjetra povezane s prolaskom fronti i sinoptičkih sustava. Desni maksimum do njega odgovara dnevnom povećanju brzine vjetra i smanjenju preko noći, a najdesniji maksimum predstavlja mikroskalne vrtloge koji traju od 10 s do 10 min.

Energijski procjep se nalazi negdje blizu 1 h. Gibanja lijevo od njega su povezana sa srednjim strujanjem, a desno s turbulencijom.



**Slika 1:** Shematski prikaz spektra brzine vjetra blizu tla (Preuzeto iz Stull, 1988.).

Određivanje skale turbulentnog usrednjavanja nužna je kako bi se mogle odrediti veličine turbulencije kao što je TKE. Također, važno je što točnije odrediti skalu usrednjavanja turbulencije, jer ako je ona preduga mogu se uključiti procesi koji



nisu turbulentni već mezoskalni, a ako je skala urednjavanja turbulencije prekratka, mogu se isključiti procesi koji jesu turbulentni.

Gustoća spektra energije  $S(f)$  je:

$$S(f) = \frac{E(f)}{\Delta f} \quad (8)$$

gdje je  $E(f)$  energija, a  $\Delta f$  razmak između susjednih frekvencija. Stoga se ukupna energija može dobiti integriranjem gustoće spektra po svim frekvencijama:

$$E = \int S(f) df. \quad (9)$$

Također, ta relacija je jednaka ukupnoj varijanci  $\sigma^2$ , koju još možemo zapisati kao:

$$E = \int S(f) f d(\ln f) \quad (10)$$

Prema hipotezi Kolmogorova jednodimenzionalni spektar komponente brzine prati pravac u log-log sustavu s koeficijentom smjera  $-\frac{5}{3}$  u inercijalnom području:

$$S_i(k) = \alpha_i \varepsilon^{2/3} k^{-5/3} \quad (11)$$

gdje je  $S_i(k)$  spektar snage,  $k$  je valni broj, a  $\alpha_i$  Kolmogorovljeva konstanta za određenu komponentu brzine (npr. Stull, 1988). Relacija (11) se može zapisati u logaritamskom obliku:

$$\log(S_i(k)) = -\frac{5}{3} \log k + \log(\alpha_i \varepsilon^{2/3}) \quad (12)$$

Preuređenjem izraza (11),  $\varepsilon$  se može računati kao:

$$\varepsilon = \left( \frac{k^{\frac{5}{3}} S_i(k)}{\alpha_i} \right)^{3/2}. \quad (13)$$

Koristeći Taylorovu hipotezu (7) dolazi se do izraza korištenog u ovom radu za računanje viskozne disipacije:

$$\varepsilon = \frac{2\pi}{\bar{u}} \left( \frac{f^{\frac{5}{3}} S_i(f)}{\alpha_i} \right). \quad (14)$$

Za  $\alpha_i$  se uzima da je 0.53 (npr. Večenaj i sur., 2010).

## 2.5 Parametrizacija odnosa viskozne disipacije i TKE

Viskozna disipacija se može parametrizirati ako se zna TKE (npr. Mellor i Yamada, 1974) :

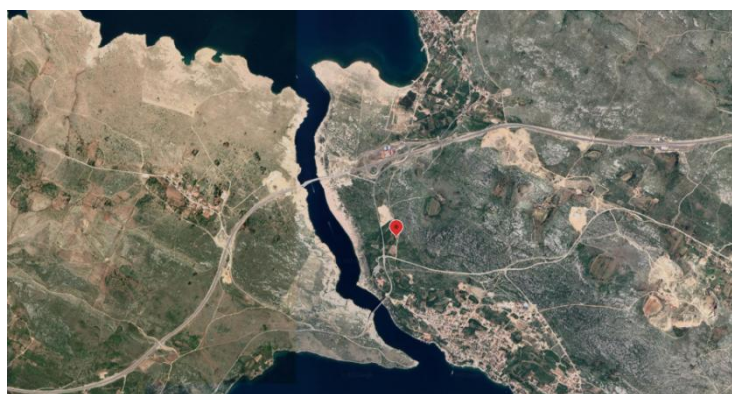
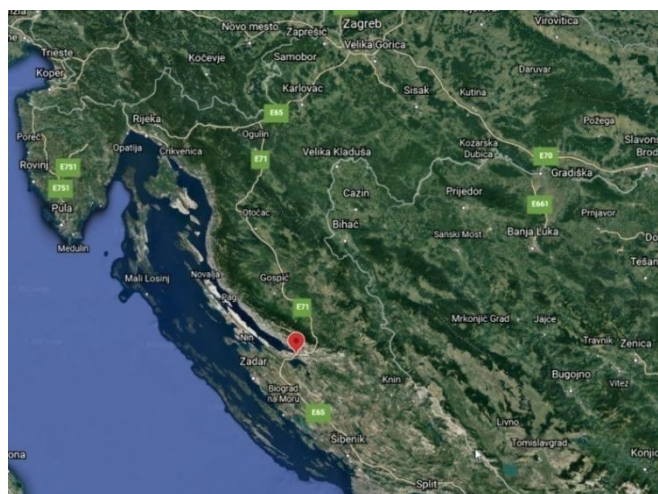
$$\varepsilon = \frac{TKE^{3/2}}{\Lambda}. \quad (15)$$

Parametar  $\Lambda$  je empirijska skala duljine koja je povezana s dimenzijom velikih turbulentnih vrtloga.

## 3. Podaci i metode

### 3.1 Mjerna postaja

Podaci korišteni u ovom radu dobiveni su mjerenjima ultrasoničnim anemometrom na tornju visine 10 m smještenom nedaleko od Masleničkog mosta ( $44.231351^{\circ}\text{N}$   $15.533534^{\circ}\text{E}$ , slika 2). Analiza je napravljena za vrijeme trajanja juga koje je bilo od 02.10.2020. u 13:18 h do 03.10.2020. u 23:23 h. Mjerene su tri komponente vjetra ( $u,v,w$ ) te sonična temperatura koja su vršene frekvencijom uzorkovanja od 10 Hz na visini 10 m iznad tla. Također dostupna su i mjerenja s visine 5 m, međutim aluminijski krak na koji je postavljen anemometar je u smjeru bure pa bi se podaci za jugo trebali značajno korigirati, a to ne ulazi u okvire ovog rada. Toranj je okružen podlogom karakterističnom za Jadransku obalu, gole stijene s biljnim pokrovom gariga i makije.



**Slika 2:** Gore i dolje je crvenim kružićem prikazana lokacija mjerne postaje.

Koordinatni sustav anemometra je postavljen tako da apscisa ima orijentaciju prema sjeveru, a ordinata prema zapadu. Napravljena je transformacija u desni koordinatni sustav, gdje je apscisa u smjeru istoka, a ordinata u smjeru sjevera.

Koordinatni sustav je rotiran sa smjerom apscise u smjeru srednjeg iznosa vjetra te smjera ordinate koji je okomit na nju prema gore. Za rotaciju koordinatnog sustava korištene su formule rotacije oko z osi:

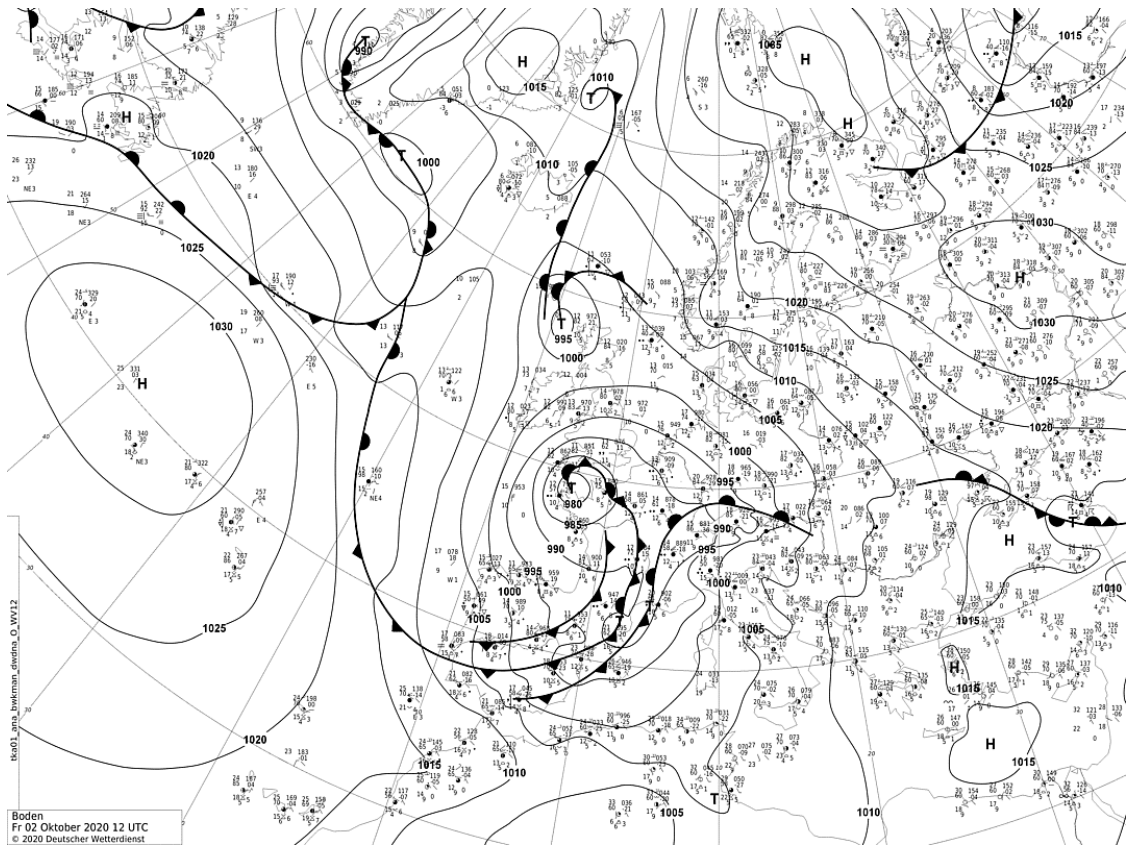
$$u_{rot} = u \cos(270 - A_{sr}) + v \sin(270 - A_{sr}) \quad (16)$$

$$v_{rot} = -u \sin(270 - A_{sr}) + v \cos(270 - A_{sr}) \quad (17)$$

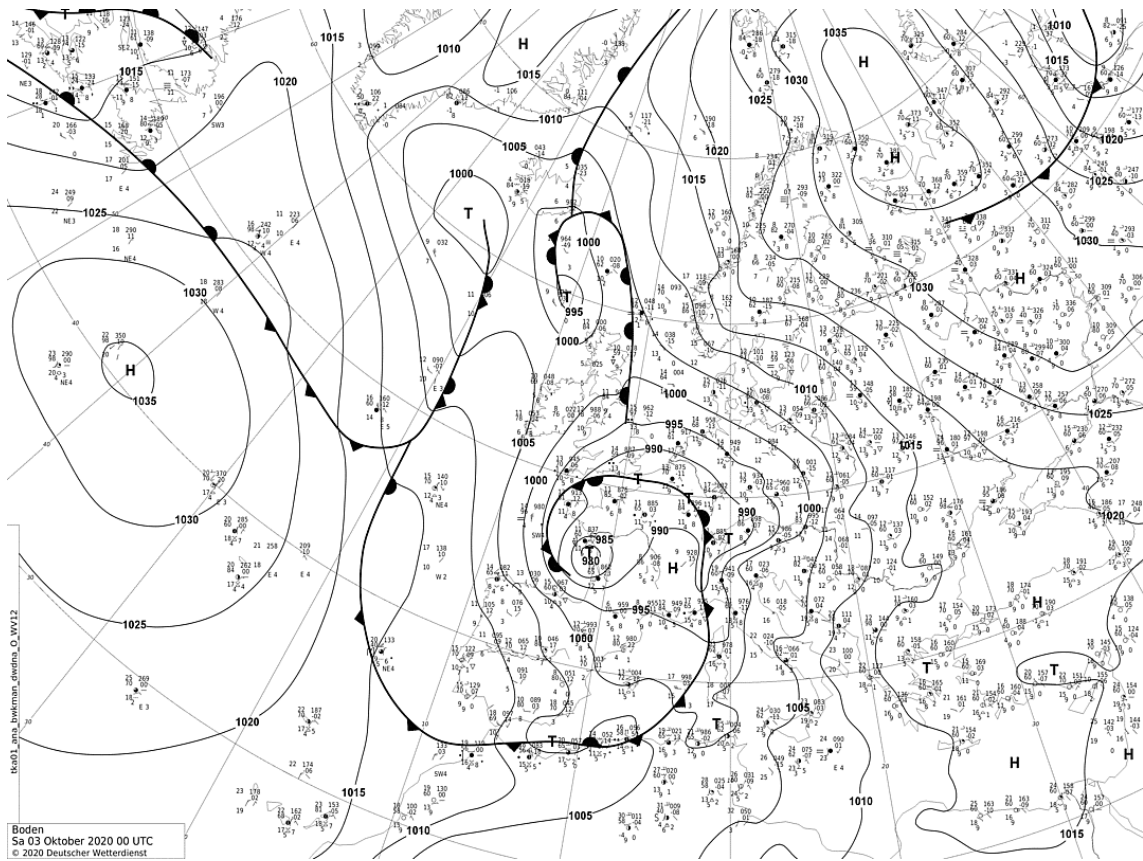
gdje je  $A_{sr} = 180 + \arctan\left(\frac{u}{v}\right)$ , srednji azimut izračunat preko srednje u i v brzine vjetra.

### 3.2 Opis sinoptičke situacije

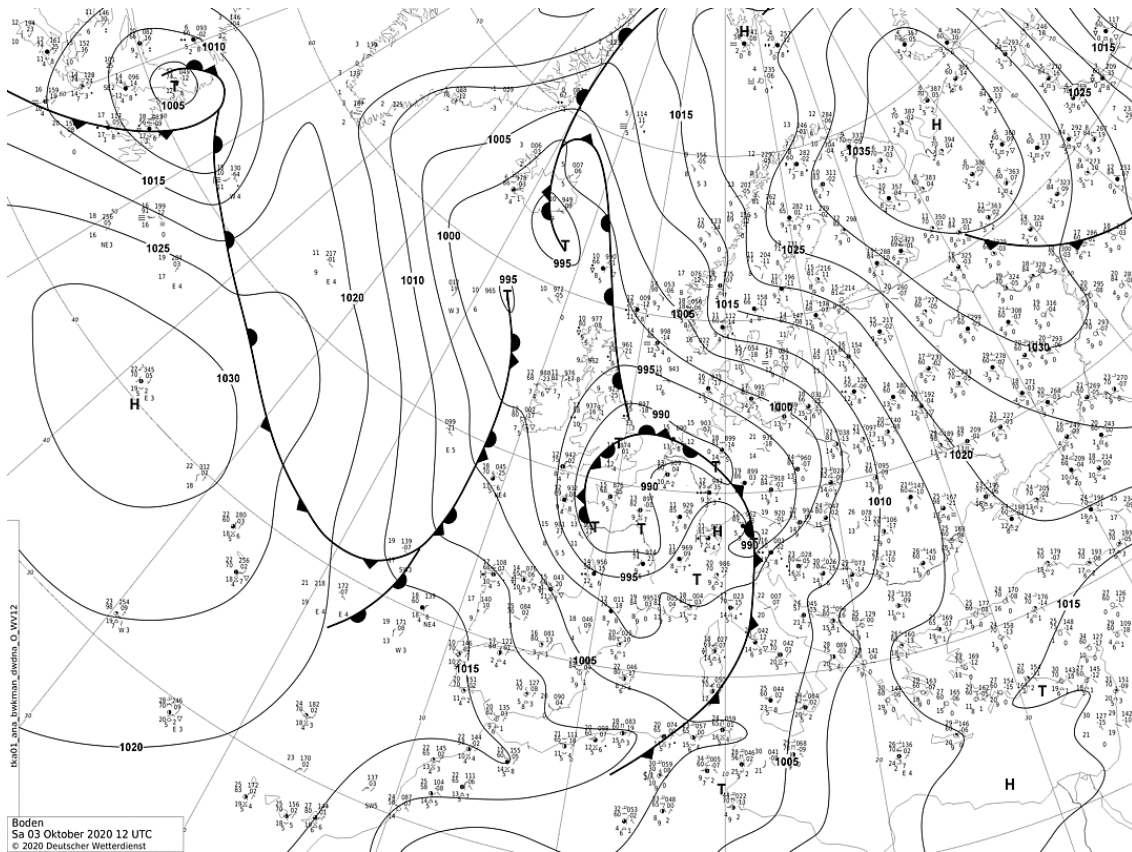
Dana 02.10.2020. u 12 UTC središte ciklone nalazilo se južno od Velike Britanije (slika 3 a)). Tada je počelo puhati jugo na Jadranskoj obali. Izobare su se počele formirati oko tog središta na većim udaljenostima, pa tako i iznad Hrvatske. Izobare su bile gušće položene što je uzrokovalo veću brzinu vjetra zbog jačih gradijenata tlaka zraka. Sa slika 3 b) i c) položaj izobara ukazuje da je vjetar jugoistočnog smjera, odnosno jugo. Fronta se 03.10.2020. premjestila preko Hrvatske što je donijelo i oborinu (slika 3 d). Iz svega navedenog i slike 3 može se odrediti da je jugo bilo ciklonalnog tipa.



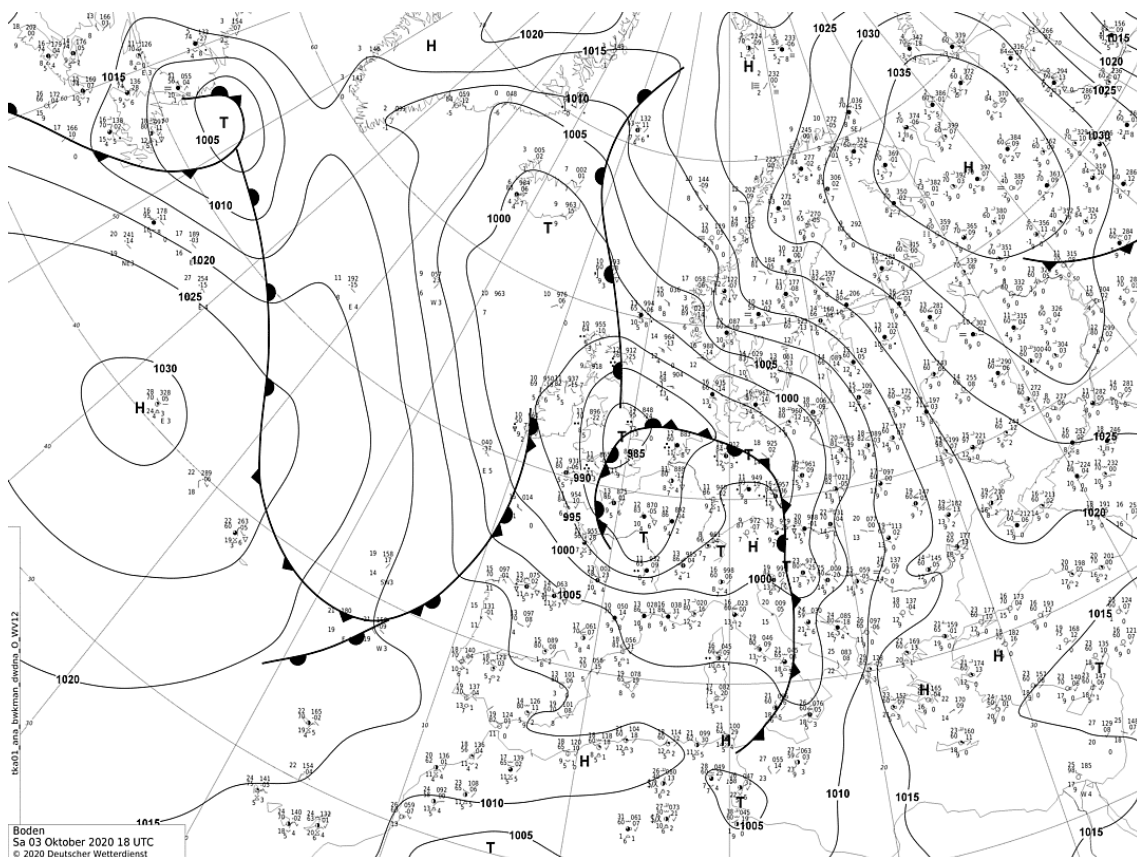
Slika 3. a) Prikaz prizemnog tlaka zraka i pripadne fronte za 2.10.2020. u 12 UTC



Slika 3. b) Prikaz prizemnog tlaka zraka i pripadne fronte za 3.10.2020. u 00 UTC



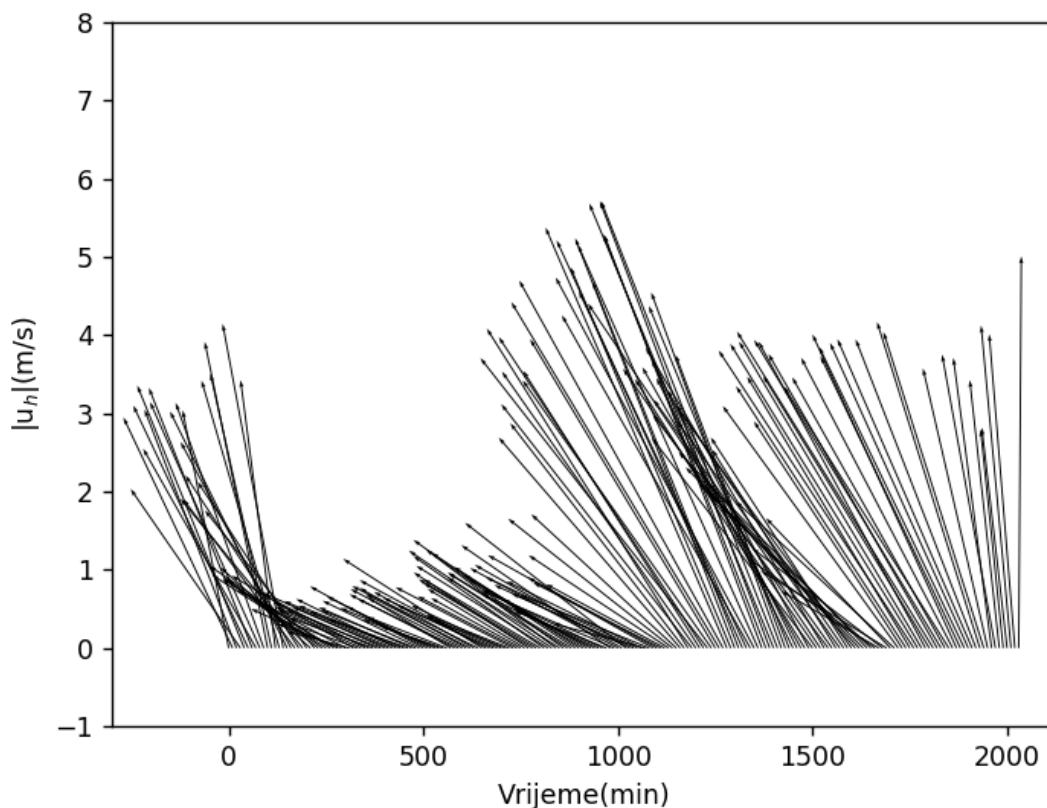
Slika 3. c) Prikaz prizemnog tlaka zraka i pripadne fronte za 3.10.2020. u 12 UTC



Slika 3. d) Prikaz prizemnog tlaka zraka i pripadne fronte za 3.10.2020. u 18 UTC

### 3.3 Podaci

Analiza podataka za promatrano jugo izrađena je u programskom paketu Pythonu. Korišteni podaci su usrednjeni na 10-minutne srednje vrijednosti horizontalne brzine vjetra. Prikazane su grafički kao vektori na slici 4. Na x osi su minute koje predstavljaju vrijeme trajanja juga (u 0 min je početak juga).



**Slika 4:** 10-minutni srednji vektori horizontalne brzine vjetra.

Može se primijetiti da je smjer vjetra pretežno jugoistočni s ukupnim srednjim azimutom od  $136.6^\circ$  (formula za srednji azimut je navedena u poglavlju 3.1). Trajanje proučavane epizode juga je bilo više od 2000 minuta što je otprilike 34 h. Jugo je u prosjeku bilo najjače nakon 1200 minuta što je oko 20 h od početka juga i dosegalo je srednje brzine od 6 m/s (slika 4). Najveća trenutna brzina koja je izmjerena iznosila je 16.5 m/s.

## 4. Rezultati i diskusija

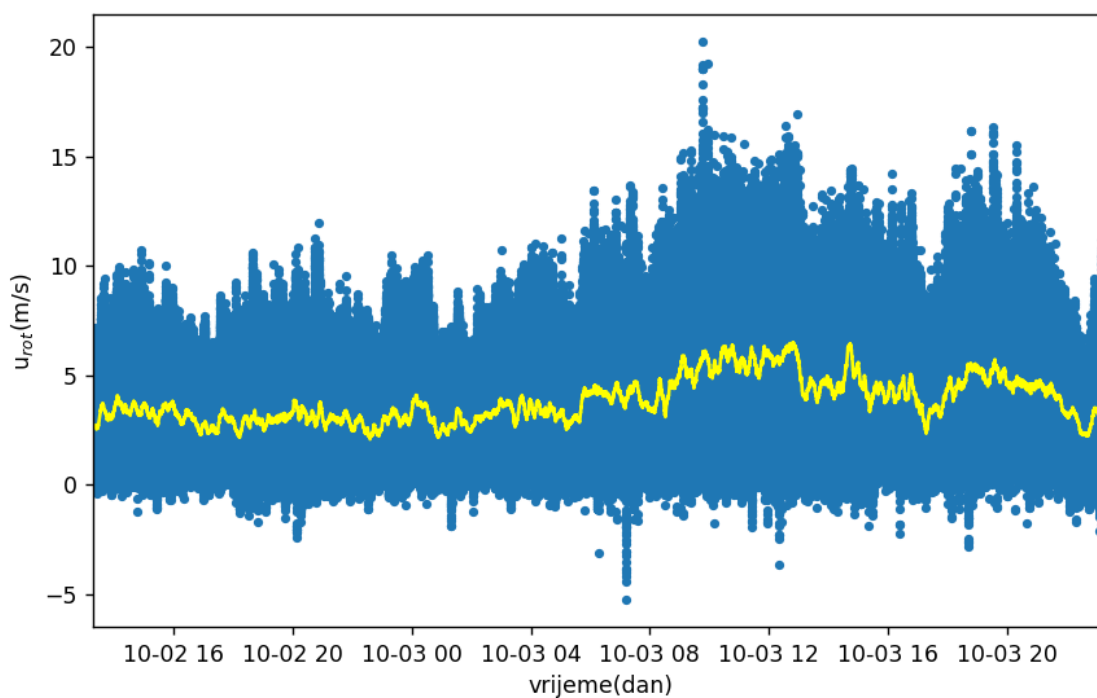
### 4.1 Priprema podataka

Nedostajući podaci u vremenskim nizovima interpolirani su kako bi se dobio neprekinuti niz podataka o brzini vjetra svakih 0.1 s (frekvencija uzorkovanja je 10 Hz). Kako bi se izračunali spektri i pronašli frekventno područje turbulencije juga, rotira se koordinatni sustav. U rotiranom koordinatnom sustavu,  $x$  koordinata je u smjeru srednjeg vjetra (niz smjer srednjeg vjetra) dok je  $y$  komponenta okomita na nju. Na taj način su dobivene komponente vjetra u srednjem smjeru puhanja juga te komponenta vjetra okomita na nju (engl. streamwise i transverse komponente).

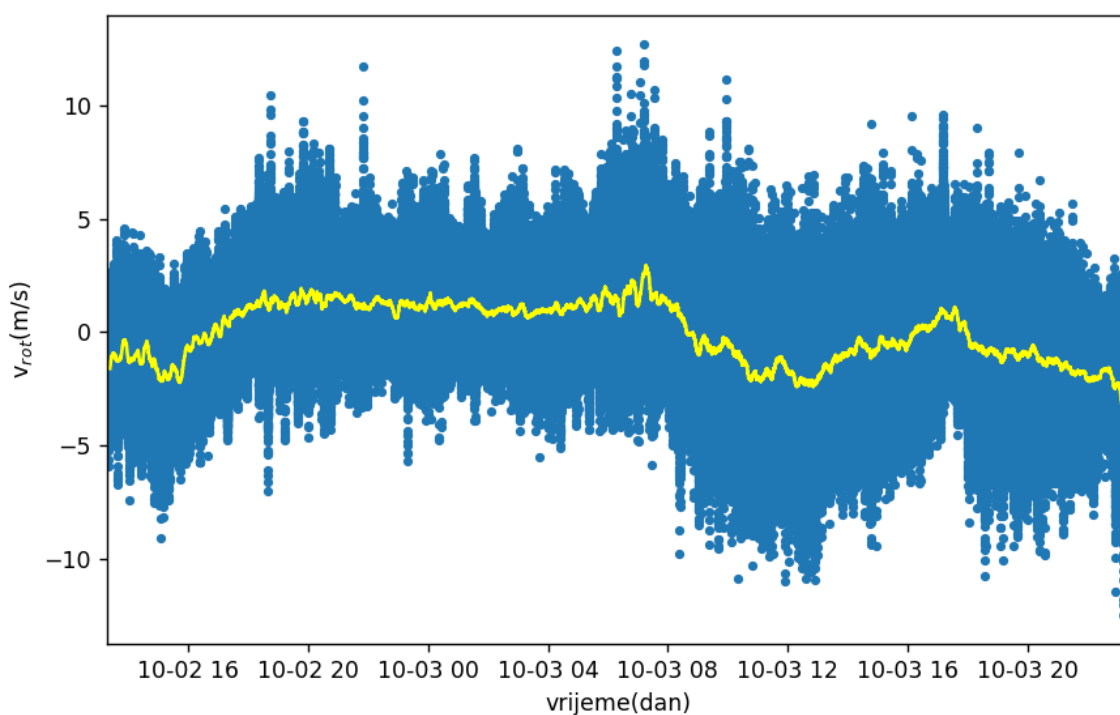
Koordinatni sustav je rotiran za  $131.45^\circ$  oko  $z$  osi (formule u Teorijskom uvodu (16) i (17)). Na slici 5 prikazane su sve tri komponente brzine u rotiranom koordinatnom sustavu s 10 minutnim kliznim srednjacima. Zbog rotacije koordinatnog sustava oko  $z$  osi,  $w$  komponenta je ostala nepromijenjena. Komponenta u smjeru srednjeg vjetra juga ( $u$  komponenta) je uglavnom pozitivna što se i očekuje jer je to komponenta u srednjem smjeru puhanja juga. Maksimalna brzina  $u$  komponente je 20.2 m/s. Poneka vrijednost je negativna jer se mijenja smjer vjetra u odnosu na izračunatu srednju vrijednost (slika 4). Komponenta okomita na smjer gibanja vjetra ( $v$ ) je raspodijeljena oko 0. Sve opisano najbolje se vidi na 10 minutnom kliznom srednjaku.

Epizoda juga podijeljena je na 30-minutne blokove podataka. Svaki 30-minutni blok je rotiran u koordinatni sustav gdje je  $x$  koordinata u smjeru srednjeg iznosa vjetra tog 30-minutnog bloka, a  $y$  koordinata okomita na nju.

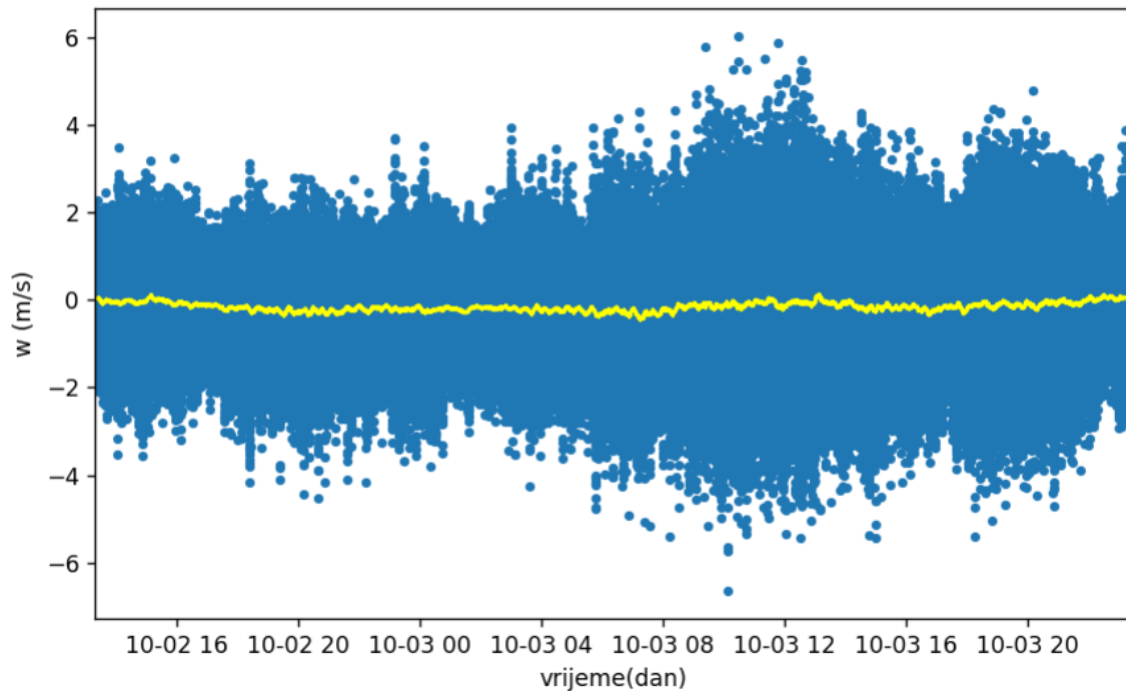




**Slika 5. a)** Prikaz  $u$  komponente brzine juga u rotiranom koordinatnom sustavu. Žutom bojom je prikazan 10 minutni klizni srednjak. Vremenska os prikazana je tako što prvi broj označava mjesec, drugi broj dan, te treći broj sat.



**Slika 5. b)** Prikaz  $v$  komponente brzine juga u rotiranom koordinatnom sustavu. Žutom bojom je prikazan 10 minutni klizni srednjak. Vremenska os prikazana je tako što prvi broj označava mjesec, drugi broj dan, te treći broj sat.



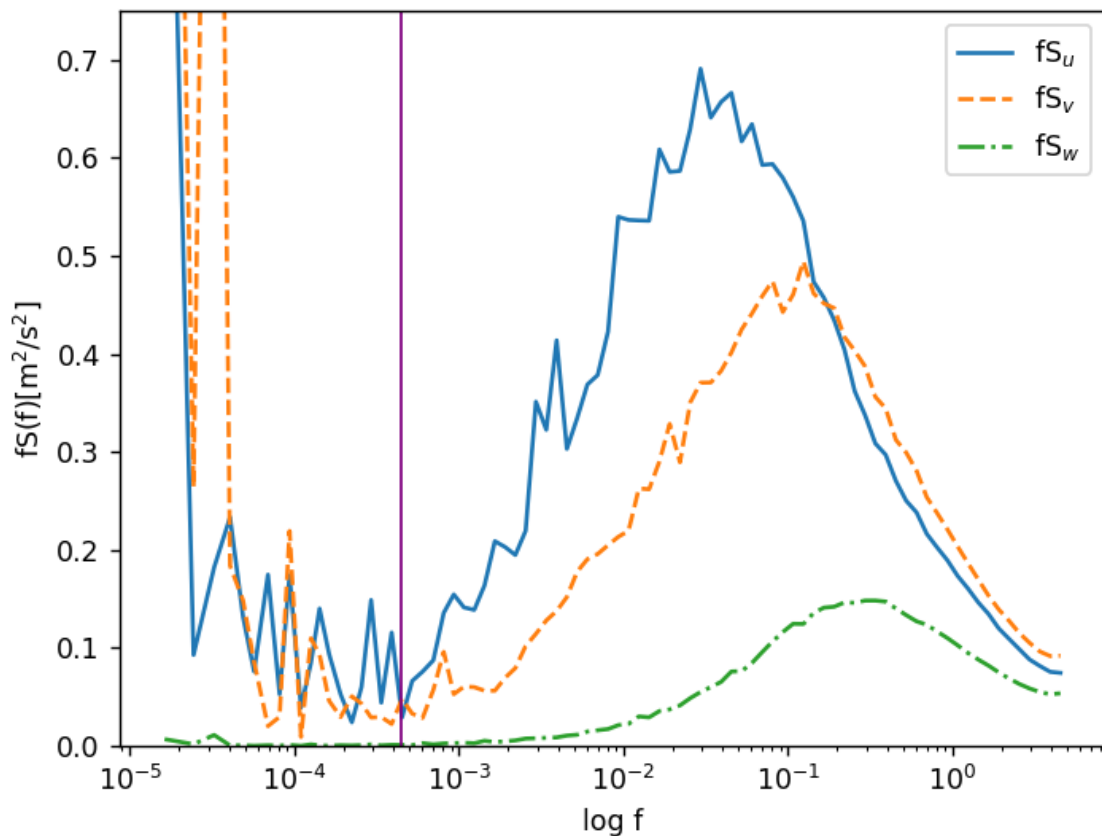
**Slika 5. c)** Prikaz  $w$  komponente brzine juga u rotiranom koordinatnom sustavu. Žutom bojom je prikazan 10 minutni klizni srednjak. Vremenska os prikazana je tako što prvi broj označava mjesec, drugi broj dan, te treći broj sat.

## 4.2 Spektri snage brzina

Na temelju prijašnjih istraživanja pokazano je da mezoskalna gibanja uglavnom ne utječu značajno na generiranje turbulentnih tokova u atmosferskom graničnom sloju. U idealiziranom slučaju postoji jasna granica u Fourierovom spektru za atmosferske varijable između sinoptičke skale i mikroskale na mezoskali koje je objašnjeno u teorijskom uvodu.

Određivanje skale usrednjavanja turbulentnih tokova nam je potrebno kako bi se eliminirala gibanja na sinoptičkoj skali i mezoskali. Izračunat je spektar snage brzina sve tri komponente brzine iz kojeg možemo odrediti potrebnu skalu. Spektri snage su izračunati pomoću brze Fourierove transformacije, tj. „fast Fourier transform“ (FFT) koji su izgladjeni usrednjavanjem po blokovima. Korišteno je 16 blokova po dekadi frekvencija ravnomjerno raspoređenih duž logaritamske skale. Pri crtanju grafa spektri su pomnoženi s frekvencijom jer područje ispod krivulje odgovara varijanci, odnosno energiji (izraz (10)).

Skala usrednjavanja turbulencije iznosi 30 minuta (slika 6) i određena je kao minimum energije horizontalnih komponenti brzina koji se zove energijski minimum (eng. energy gap). Energijski minimum (procjep) je zapravo granica između sinoptičke skale i mikroskale. Na slici 6 označen je vertikalnom ljubičastom linijom. Spektar  $w$  komponente nema energijski procjep što nam govori da  $w$  komponenta sadrži najmanje varijance (energije) brzine vjetra (što se vidi i s iznosa na ordinati). Najveći udio u energiji doprinosi horizontalna ( $u$ ) komponenta vjetra.



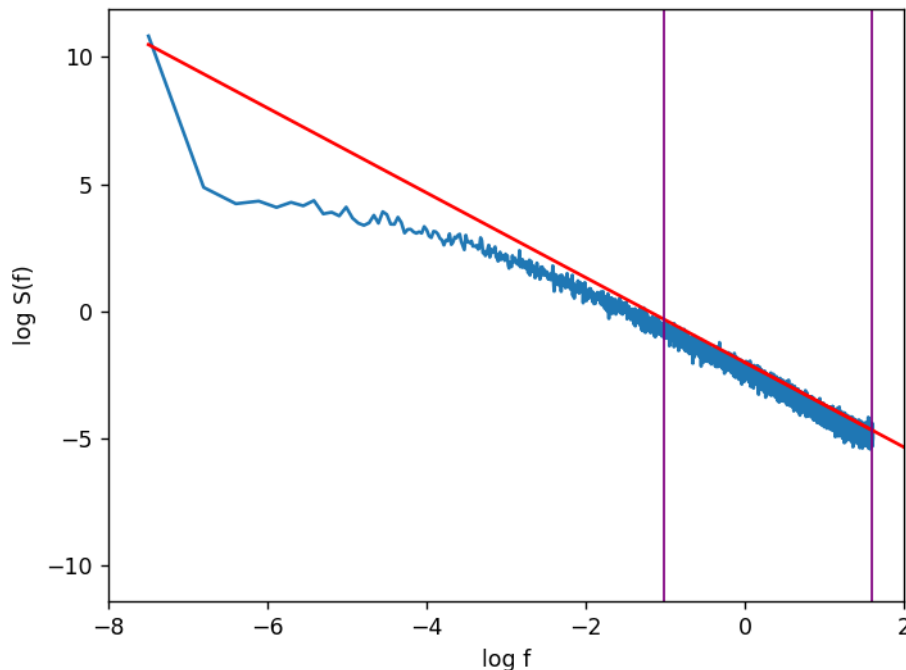
**Slika 6:** Spektri snage brzina  $u$ ,  $v$  i  $w$  komponente brzine. Vertikalnom linijom je prikazan energijski minimum.

### 4.3 Prilagodba $-5/3$ pravca na log-log spektar

Određivanjem prikladne vremenske skale usrednjavanja koja iznosi 30 min, epizoda juga je podijeljena na 30-minutne blokove podataka. Svaki 30-minutni blok je rotiran u koordinatni sustav gdje je  $x$  koordinata u smjeru srednjeg iznosa vjetra tog 30-minutnog bloka, a  $y$  koordinata okomita na nju. Na taj način je svaki 30-minutni blok imao svoj koordinatni sustav (pomoću izraza (16) i (17)). Potom su izračunate turbulentne perturbacije koje su dobivene oduzimanjem srednje brzine 30-minutnog bloka od brzine u rotiranom koordinatnom sustavu.

Metoda inercijalne disipacije je bazirana na (11). Pravo značenje pravca  $-5/3$  možemo vidjeti u (12) koja je logaritamski oblik (11).

Spektar na slici 7 izračunat je za horizontalnu ( $u$ ) komponentu vjetra u rotiranom koordinatnom sustavu koji je dobiven kao medijan od svih 30-minutnih blokova podataka, kojih ima 68. Pravac koeficijenta  $-5/3$  označen je crvenom bojom. Određeno je područje frekvencija koje odgovara pravcu  $-5/3$  (inercijalno područje) i označeno je vertikalnim ljubičastim linijama. Pravac dobro odgovara spektru za frekvencije između 0.095 Hz i 39,99 Hz što je vremenski  $\approx 0.03$ -10.4 s.

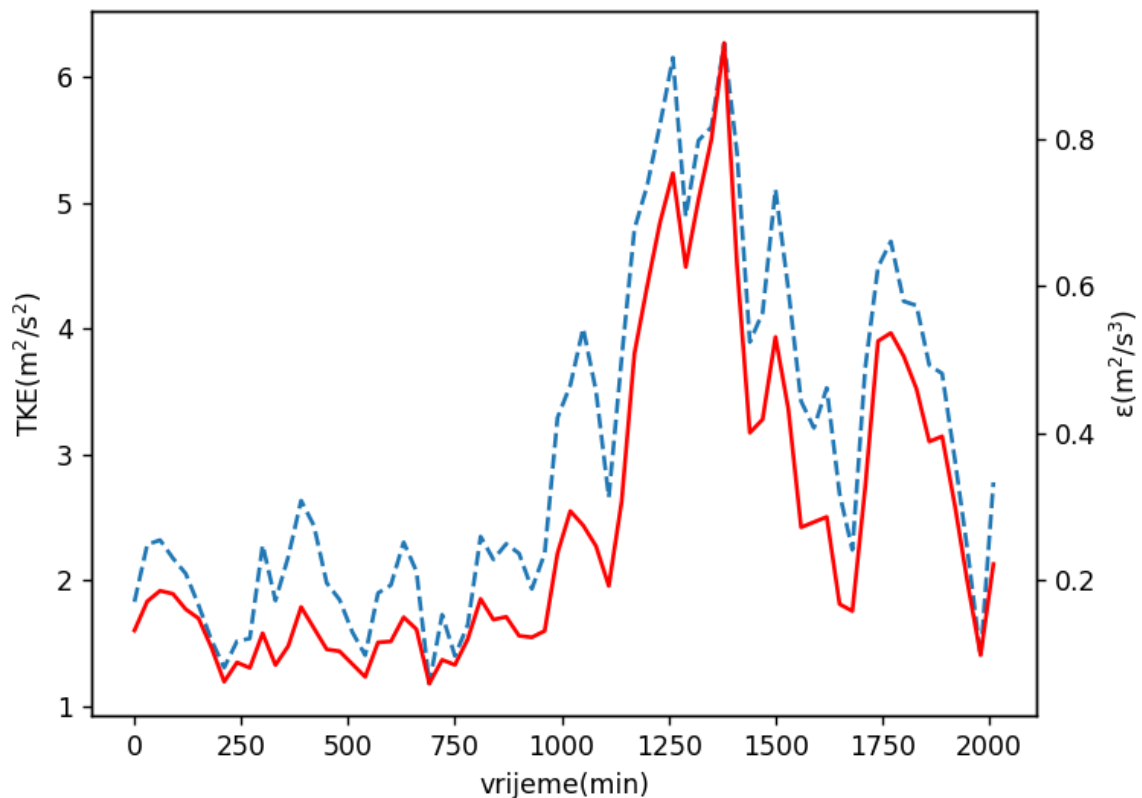


**Slika 7:** Log-log prikaz spektra. Pravac koeficijenta smjera  $-5/3$  prikazan je crvenom bojom. Vertikalnim ljubičastim linijama označeno je inercijalno područje.

Time je pokazano da se metoda inercijalne disipacije može koristiti za računanje  $\varepsilon$  i izvan inercijalnog područja jer spektar prati pravac koeficijenta smjera - 5/3 na većim skalama.

#### 4.4 Vremenski niz TKE i $\varepsilon$

Za računanje TKE korištena je relacija (4), a za  $\varepsilon$  relacija (14). Na slici 8 prikazane su TKE i  $\varepsilon$  u vremenu. Vidimo da krivulje imaju isti oblik tj. da se TKE i  $\varepsilon$  dobro prate što nam govori da su te dvije varijable međusobno usko povezane o čemu će biti govora u sljedećem poglavlju. Vrijednosti TKE i  $\varepsilon$  kvalitativno se razlikuju za otprilike faktor 10 jer su apsolutne vrijednosti disipacije  $\varepsilon$  manje. Također, uočava se da su TKE i  $\varepsilon$  najveći oko 1250-e minute kada je jugo bilo i najjače.



Slika 8: Vremenski niz TKE (plava crtkana linija) i  $\varepsilon$  (crvena puna linija).

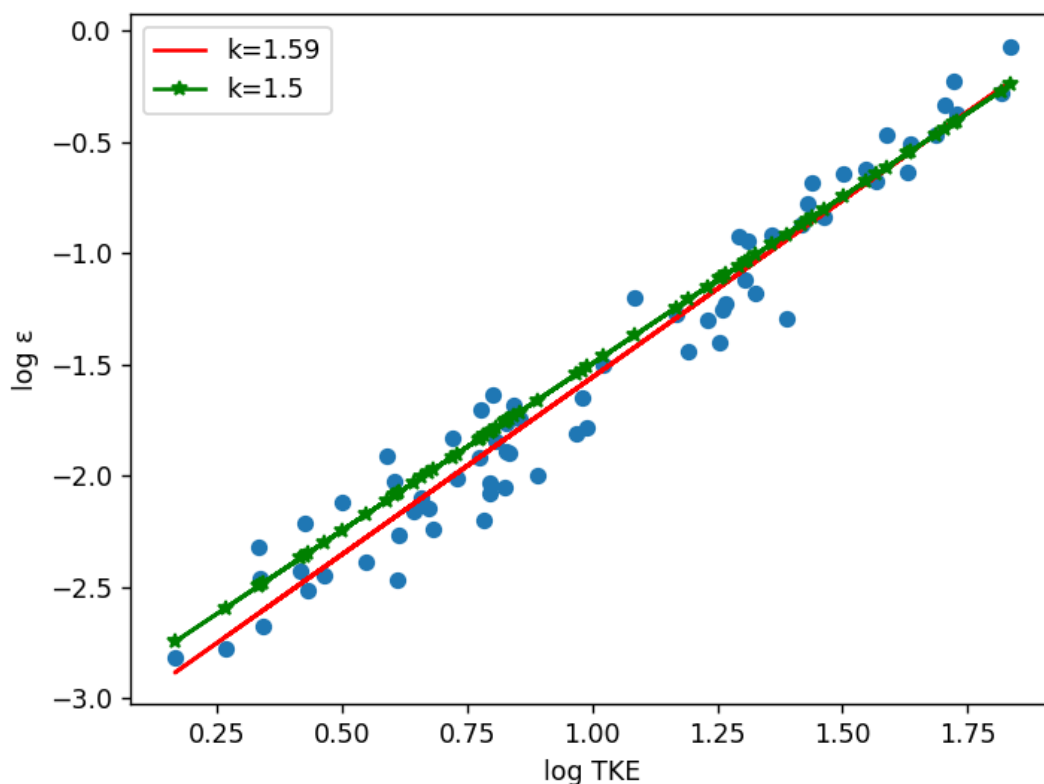
## 4.5 Odnos TKE i $\varepsilon$

Za već izračunate TKE i  $\varepsilon$  nacrtan je log-log prikaz kako bi se potvrdio parametrizacijski odnos tih varijabli (15). Napravljena je linearna regresija koristeći izraz:

$$\varepsilon = aTKE^b.$$

U log-log prikazu ta je ovisnost linearna. Efikasnost ovih linearnih prilagodbi je provjerena kvadratnim koeficijentom korelacije koji je bio vrlo visok za linearizaciju izmjerenih podataka (iznosi 0.93).

Očekuje se da je koeficijent b jednak 1.5. Iz podataka je dobiveno da on iznosi 1.59, što se dosta dobro slaže s teorijskom pretpostavkom koja se obično koristi u numeričkim modelima pri parametrizaciji. Za  $\varepsilon$  dobiveno odstupanje je moguće zbog utjecaja transporta TKE tlakom i turbulencijom te advekcije u (3) koji mogu ne lokalno preraspodijeliti TKE što onda utječe na lokalno smanjenje ili povećanje TKE.



**Slika 9:** log-log prikaz TKE i  $\varepsilon$ . Linearna prilagodba podataka je prikazana crvenom bojom, dok je ona s teorijskim koeficijentom smjera pravca 1.5 prikazana zelenom (\*-).

U radu Večenaj i sur. (2010) je za koeficijent smjera za buru dobiven rezultat 1.3, što više odstupa od teorijske vrijednosti nego rezultat dobiven za jugo.

Kako se koeficijent  $b$  razlikuje od očekivane teorijske vrijednosti 1.5, napravljena je nova linearna prilagodba uz postavljanje koeficijenta smjera  $b_t = 1.5$ :

$$\varepsilon = a_t TKE^{b_t}.$$

Na taj način odgovara dimenzionalna analiza u (15) te se može izračunati empirijska skala duljine ( $\Lambda$ ). Ona je izračunata kao  $a_t^{-1}$ .

Za drugu linearnu regresiju s forsiranim koeficijentom smjera izračunat je koeficijent korelacije koji je iznosio 0.98 što ponovno pokazuje veliku ovisnost između dviju varijabli (TKE i  $\varepsilon$ ). Odstupanja prilagodbi nisu velike što nam zapravo govori da se metodom inercijalne disipacije dobro izračunala viskozna disipacija.

Empirijska skala duljine je izračunata te iznosi:  $\Lambda=18,27$  m. U radu Večenaj i sur. (2010) empirijska skala za buru iznosi otprilike 60 m što je puno veće od skale dobivene za jugo.

## 5. Zaključak

Jugo je vjetar jugoistočnog smjera koji može doseći olujne i orkanske brzine.

U ovom radu su istraživane mikroskalne karakteristike turbulencije juga koje do sada nisu nikada proučavane. Analiziran je slučaj juga koji je trajao  $\approx 34$  h te je mjereno blizu Masleničkog mosta. Mjerene su tri komponente brzine vjetra i sonična temperatura frekvencijom uzorkovanja 10 Hz na visini 5 i 10 m. U radu su korištene vrijednosti mjerene na visini 10 m zbog načina na koji je postavljen anemometar.

Za proučavanje mikroskalnih karakteristika juga bilo je potrebno odrediti skalu usrednjavanja turbulencije koja je nužna za određivanje turbulentnih fluktuacija. Skala usrednjavanja turbulencije određena je pomoću Fourierove spektralne analize.

Fourierov spektar horizontalne komponente brzine vjetra ima vidljiv energijski minimum koji pokazuje prijelaz iz sinoptičke u mikroskalu na mezoskali. Za promatranu epizodu juga skala turbulentnog usrednjavanja iznosi 30 min. Podaci su podijeljeni na 30-minutne blokove pomoću kojih su izračunate fluktuacije potrebne za računanje  $TKE$ .

Provjereno je slaganje pravca koeficijenta smjera  $-5/3$  sa spektrom. Pravac dobro prati spektar i na većim vremenskim skalama što nam ukazuje na to da možemo koristiti metodu inercijalne disipacije za računanje  $\varepsilon$ .

Napravljena je linearna prilagodba odnosa  $TKE$  i  $\varepsilon$  gdje je provjeren njihov odnos. Dobiveno je u log-log prikazu da je odnos linearan te da se on dosta dobro slaže s teorijskom ovisnosti gdje je  $\varepsilon$  proporcionalan s  $TKE^{1.5}$ . Iz parametrizacijske relacije odnosa  $TKE$  i  $\varepsilon$  određena je empirijska skala karakteristične duljine  $\Lambda$ . Za ovaj slučaj juga ona iznosi  $\approx 18$  m. Ta skala nam zapravo govori o veličini turbulentnih vrtloga, koji su barem za ovu epizodu juga, značajno manji nego u buri koju su analizirali Večenaj i sur. (2010).

Postoji još puno neistraženih karakteristika turbulencije juga koje bi se mogle proučiti za bolji opis jednadžbe ravnoteže  $TKE$  i njezino korištenje u numeričkim modelima uvođenjem parametrizacije. Također bi bilo zanimljivo napraviti ovu



analizu i na drugim područjima te s više epizoda juga, pa na ovoj temi ima prostora za daljnji rad.

# Literatura

- Bajić, A. (2011): *Prostorna raspodjela očekivanih maksimalnih brzina vjetra na složenom terenu Hrvatske kao podloga za ocjenu opterećenja vjetrom*. Doktorski rad, Prirodoslovno-matematički fakultet, Sveučilište u Zagrebu, 110 str.
- Belušić, D., Klaić, Z. B. (2006): *Mesoscale dynamics, structure and predictability of a severe Adriatic bora case*. Meteorol. Z.,15(2), 157-168
- Frech, M. (2007): *Estimating the turbulent energy dissipation rate in an airport environment*. Boundary-Layer Meteorol 123: 385–393
- Grisogono, B., Belušić, D. (2008): *Improving mixing length-scale for stable boundary layers*. Q J R Meteorol Soc 134: 2185-2192
- Grisogono, B., Belušić, D. (2009): *A review of recent advances in understanding the meso and micro-scale properties of the severe Bora wind*. Tellus A 61: 1-16
- Kaimal, J. C., Finnigan, J. J. (1994): *Atmospheric Boundary Layer Flows. Their Structure and Measurement*, Oxford: Oxford University Press, 289 str.
- Makjanić, B. (1978): *Bura, jugo, etezija*. Prilozi poznavanju vremena i klime SFRJ., sv.5, 1-43
- Mellor, G.L., Yamada, T. (1974): *A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers*. J Atmos Sci 31: 1791–1806
- Poje, D. (1992): *Wind persistence in Croatia*. – Inter. J. Climatol., 12, 569-586
- Stull, R. B.(1988): *An introduction to Boundary Layer Meteorology*, 666 str.
- Šoljan, V., Belušić, A., Šarović, K., Nimac, I., Brzaj, S., Suhin, J., Belavić, M., Večenaj, Ž., Grisogono, B. (2018): *Micro-Scale Properties of Different Bora Types*. Atmosphere 9 116
- Tennekes, H., Lumley, J., (1972): *A First Course in Turbulence*. MIT Press, Cambridge, 300 str.
- Večenaj, Ž. (2012): *Characteristics of the bora related turbulence*. Doktorski rad, Prirodoslovno-matematički fakultet, Sveučilište u Zagrebu 80 str.

- Večenaj, Ž., Belušić D., Grisogono, B. (2010): *Characteristics of the near-surface turbulence during a Bora event*. Ann Geophys 28: 155-163
- Večnaja, Ž., De Wekker S.F.J., Grubišić, V. (2011): *Near surface characteristics of the turbulence structure during a mountain wave event*. J Appl Meteor Climat 50: 1088-1106
- Vukičević, V. (1991): *Statistical analysis of scirocco storm in Split*. – News, 37, Magazin of Marine Meteorology, Split, 7-18
- Vukičević, V., Jurčec, V., Ivančan-Picek, B. (2005): *Adriatic jugo wind during 2000 – 2004*. Hrvatski meteorološki časopis, 418-421