

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

DIPLOMSKI RAD

PROUČAVANJE TURBULENTNIH TOKOVA
BURE U NAVJETRINI SPLITA

NEVIO BABIĆ

Voditelj: Prof. dr. sc. Branko Grisogono

Suvoditelj: Dr. sc. Željko Večenaj

Zagreb, 2013.

Članovi komisije:

1. Prof. dr. sc. Branko Grisogono, predsjednik

2. Dr. sc. Ivana Herceg-Bulić, član

3. Prof. dr. sc. Davorka Herak, član

4. Dr. sc. Željko Večenaj, zamjenik

5. Mr. sc. Ivica Sović, zamjenik

Potpis članova komisije:

Zahvaljujem se prof. dr. sc. Branku Grisogonu na mentorstvu za ovaj diplomski rad, svim savjetima, opaskama i prijedlozima.

Zahvaljujem se dr. sc. Željku Večenaju na svim savjetima, prijedlozima, podršci i strpljenju za sva moja pitanja i upite.

Zahvaljujem se Državnom hidrometeorološkom zavodu i Geofizičkom odsjeku PMF-a na ustupljenim podacima.

Zahvaljujem se Geofizičkom odsjeku PMF-a na ustupljenosti računalnih resursa za analizu i obradu podataka.

Zahvaljujem se roditeljima i sestri na dugogodišnjoj podršci, razumijevanju i strpljenju.

Sadržaj

1 Uvod	1
1.1 Bura	1
1.2 Turbulentna gibanja	2
2 Teorijski pregled	3
2.1 Reynoldsovo osrednjavanje	3
2.2 Fourierova spektralna analiza i metoda ogiva	5
2.3 Turbulentna kinetička energija, TKE	7
2.4 Viskozna disipacija, ϵ	8
2.5 Parametrizacija viskozne disipacije	9
3 Podaci	10
3.1 Lokacija mjernog tornja	10
3.2 Kontrola kvalitete podataka	12
3.3 Kriteriji za definiciju bure	15
4 Rezultati i diskusija	17
4.1 Određivanje vremenske skale osrednjavanja	17
4.1.1 Spektri komponenti brzine vjetra	17
4.1.2 Ogive turbulentnih tokova	19
4.2 Turbulentni tokovi	22
4.2.1 Promjenjivost turbulentnih tokova s visinom	22
4.2.2 Divergencija turbulentnih tokova	28
4.3 Analiza jednadžbe ravnoteže TKE	30
4.3.1 Proračun viskozne disipacije	30
4.3.2 Zatvaranje jednadžbe ravnoteže TKE	35
4.4 Parametrizacijski odnos TKE i ϵ	37
5 Zaključak	40
6 Dodatak A	42
7 Dodatak B	45
8 Bibliografija	46

1 Uvod

1.1 Bura

Jak, relativno hladan i mahovit vjetar koji najčešće puše iz sjeveroistočnog kvadranta na istočnoj obali Jadranskog mora poznat je pod nazivom bura (npr. Makjanić, 1978). Bura puše približno okomito na smjer pružanja Dinarida, koji se proteže od sjeverozapada prema jugoistoku. Na svom sjevernijem dijelu (gorska Hrvatska) Dinaridi su relativno uski, sa širom i blagom navjetrinskom te uskom i strmom zavjetrinskom (priobalnom) stranom (npr. najviši vrh Velebita, Vaganski vrh, nalazi se na 1757 m.n.v.). Na svom središnjem i južnom dijelu sve se više šire i u prosjeku postaju viši (Dinara (1848 m.n.v.), Vickov stup (1325 m.n.v.), Sveti Jure (1762 m.n.v.)). Olujni vjetar sličnog tipa javlja se i u ostatku svijeta: Karpati, obala Crnog mora, Meksiko, Japan, Stjenjak, itd. (npr. Makjanić, 1978; Magjarević, 2011).

Bura puše tijekom cijele godine s trajanjem od nekoliko sati do nekoliko dana, ovisno o dominirajućim baričkim sustavima nad Jadranom i konfiguraciji istih nad većim područjem Europe. Tako razlikujemo tri osnovna tipa bure (npr. Večenaj, 2005): anticiklonalna (*jasna*) bura, relativno dugotrajna i jaka, koja obično puše kad se nad većim dijelom Europe proteže prostorno polje visokog tlaka zraka (npr. Sibirska anticiklona); ciklonalna (*mračna*) bura, praćena oblačnim i kišnim vremenskim prilikama, tipična je pri prolasku ciklone iznad Jadrana; frontalna bura, uzrokovana prodom hladnog zraka iza hladne fronte, koja može biti vrlo intenzivna no trajanja ne duljeg od jednog do dva dana. Bura ima povoljan biometeorološki utjecaj na ljude (izuzev olujnog i orkanskog djelovanja vjetra i dojma hladnoće) (npr. Večenaj, 2005). S druge strane, bura ima vrlo nepovoljan utjecaj na biljni svijet jer isušuje tlo i nanosi velike količine soli na npr. istočne, navjetrinske strane otoka najbližih obali (Krk, Rab, Prvić, Pag, itd.). Bura je također uzrok i poteškoćama u cestovnom i trajektnom prometu, kao i u građevnoj industriji gdje je pri projektiranju i gradnji nužno uzeti u obzir njen mahovit i orkanski karakter.

Dvadeseto stoljeće je obilježeno prvenstveno istraživanjima makroskalnih karakteristika puhanja bure (npr. Yoshino, 1976; Jurčec, 1981; Ivančan-Picek i Tutiš, 1996), pri čemu je bura dugi niz godina smatrana tipičnim oborušavajućim vjetrom katabatičkih svojstava. Zahvaljujući projektu ALPEX, u sklopu kojeg su obavljena temeljita mjerjenja (kako prizemna, tako i avionska) s ciljem izučavanja bure, uočena je važnost hidrauličke teorije strujanja za pravilan opis bure (npr. Smith, 1987; Bajić, 1991; Gohm i sur., 2008; Grisogono i Belušić, 2009a). Pored ALPEX projekta, bura je istraživana i tijekom MAP (*Mesoscale Alpine Programme*) projekta tijekom 1999. godine (npr. Bougeault i sur., 2001) te tijekom nedavnog WINDEX (*Wind resources and forecasting in complex terrain of Croatia*) projekta (npr. Horvath i sur., 2010). Podaci dobiveni u okviru WINDEX projekta su korišteni i u ovom radu.

1.2 Turbulentna gibanja

Turbulencija danas predstavlja posljednje neriješeno poglavlje klasične mehanike, ponajviše zahvaljujući kompleksnosti i kaotičnosti takvog gibanja. Ona predstavlja temelj mikroskalne meteorologije, čime se podrazumijeva neopravданost primjene klasičnih pretpostavki makroskale (kvazigeostrofičnost, itd.) na turbulentna gibanja.

Turbulentno strujanje znači pojačano miješanje u fluidu. Takvo strujanje rezultira pojavom međusobno superponiranih vrtloga različitih veličina (npr. Stull, 1988). Za razliku od slobodne atmosfere (gornji, "sinoptički" dio troposfere), atmosferski granični sloj je okarakteriziran upravo takvim vrtlozima, kao i dominirajućim turbulentnim prijenosom energije, koji predstavlja glavnu komunikaciju s promjenama meteoroloških elemenata neposredno iznad površine tla.

Glavni cilj ovog rada je procjena i proučavanje vremenskih nizova turbulentnih tokova topline i impulsa bure na području srednjeg Jadrana (navjetrina Splita). Njihov proračun zahtijeva pravilno definiranje turbulentnih perturbacija komponenti polja brzine vjetra i temperature, za čiju je procjenu i proračun potrebno što točnije odrediti vremensku skalu osrednjavanja turbulentnih gibanja. Široka rasprostranjenost članova turbulentnih tokova u različitim hidrodinamičkim jednadžbama tipičnih za mikroskalu (npr. osrednjene jednadžbe gibanja i termodinamike, prognostička jednadžba za turbulentnu kinetičku energiju, itd.) omogućava nove spoznaje o dinamici bure.

Ovaj diplomski rad predstavlja prvi rad koji se izravno bavi turbulentnim tokovima bure na području srednjeg Jadrana. Neki od rezultata ove radnje prezentirani su u Babić i sur. (2013a, b) u obliku postera na dvjema međunarodnim konferencijama: *32nd International Conference on Alpine Meteorology* (ICAM2013) i *Davos Atmosphere and Climate Assembly* DACA-13. Ovaj rad predstavlja prirodno poopćenje tih dvaju konferencijskih radova.

2 Teorijski pregled

2.1 Reynoldsovo osrednjavanje

Za definiranje turbulentnih perturbacija (u konačnici i turbulentnih tokova) potrebno je provesti postupak Reynoldsovog osrednjavanja izmijerenih varijabli (npr. Reynolds, 1895).

Bit Reynoldsovog osrednjavanja leži u postojanju lokalnog minimuma u spektrima atmosferskih varijabli (tzv. spektralni procjep, eng. *spectral gap*), koji "razdvaja" procese na velikoj (sinoptičkoj) skali od onih na maloj (mikro) skali (npr. Van der Hoven, 1957; Stull, 1988). Postojanje takvog minimuma nije uvijek očito te je tada potrebno nekim drugim metodama doći do relativno pouzdanog iznosa vremenske skale osrednjavanja (budući da se u ovom radu koriste vremenski nizevi).

Jednom kad je takva vremenska skala osrednjavanja određena, moguće je razložiti polja osnovnih meteoroloških elemenata (poput komponenti brzine vjetra u, v, w , polja potencijalne temperature θ , itd.) na sporo promjenjivo polje \bar{a} te na brzo promjenjivu turbulentnu perturbaciju a' tog istog polja:

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

Pri tome je vremenski srednjak \bar{a} definiran na sljedeći način (τ predstavlja traženi period, odnosno vremensku skalu osrednjavanja):

$$\bar{a} = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau a(t) dt. \quad (2.2)$$

Nadalje, općenito može biti $|\bar{a}| \sim |a'|$, tj. turbulentne fluktuacije nisu male veličine pa ne vrijedi linearizacija. Primjenom ovakvog osrednjavanja na sustav sljedećih osnovnih hidrodinamičkih i termodinamičke jednadžbe (npr. Holton, 2004), gdje je već prepostavljena Boussinesquova aproksimacija:

$$\frac{Du}{Dt} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + fv + F_{rx}, \quad (2.3)$$

$$\frac{Dv}{Dt} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} - fu + F_{ry}, \quad (2.4)$$

$$\frac{Dw}{Dt} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial z} + g \frac{\theta}{\theta_0} + F_{rz}, \quad (2.5)$$

$$\frac{D\theta}{Dt} = -w \frac{d\theta_0}{dz}, \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (2.7)$$

gdje u, v, w predstavljaju komponente brzine vjetra, θ potencijalnu temperaturu, ρ_0 srednju gustoću česti zraka, p tlak zraka, $f = 2\Omega \sin \varphi$ je Coriolisov parametar, te F_{rx}, F_{ry}, F_{rz} komponente turbulentnog trenja. Uz uvažavanje određenih prepostavki prilikom Reynoldsovog

osrednjavanja (npr. iščezavanje srednjaka perturbacija, \bar{a}' , kao i umnoška srednjaka i same perturbacije, $\bar{a}'\bar{b}$), dolazimo do sustava osrednjjenih početnih jednadžbi:

$$\frac{\overline{D\bar{u}}}{Dt} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + f\bar{v} - \left[\frac{\partial \overline{u'u'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z} \right] + \overline{F}_{rx}, \quad (2.8)$$

$$\frac{\overline{D\bar{v}}}{Dt} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} - f\bar{u} - \left[\frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial z} \right] + \overline{F}_{ry}, \quad (2.9)$$

$$\frac{\overline{D\bar{w}}}{Dt} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + g \frac{\bar{\theta}}{\theta_0} - \left[\frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{w'w'}}{\partial z} \right] + \overline{F}_{rz}, \quad (2.10)$$

$$\frac{\overline{D\bar{\theta}}}{Dt} = -\bar{w} \frac{d\theta_0}{dz} - \left[\frac{\partial \overline{u'\theta'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v'\theta'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{w'\theta'}}{\partial z} \right], \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial \overline{u'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{w'}}{\partial z} = 0. \quad (2.12)$$

Novost u jednadžbama (2.8) - (2.11) predstavljaju prostorne derivacije turbulentnih tokova. Tako npr. član $\overline{u'w'}$ predstavlja vertikalni turbulentni tok impulsa u kinematičkom obliku (podijeljen s gustoćom i specifičnom toplinom zraka pri konstantnom tlaku), dok član $\overline{w'\theta'}$ predstavlja vertikalni turbulentni tok topline u kinematičkom obliku. Posebnost ovih članova leži u njihovom redu veličine jer iako perturbacije same po sebi mogu biti zanemarive, njihovi produkti u pojedinom trenutku mogu biti istog reda veličine kao i ostali članovi u gornjim jednadžbama te ih tada nije opravданo zanemariti. Matematičkim rječnikom, radi se o kovarijancama gdje je npr. turbulentni tok topline $\overline{w'\theta'}$ definiran na sljedeći način (N je ukupan broj podataka nakon blok osrednjavanja, čiji period T mora zadovoljavati $T \geq \tau$, npr. Lee i sur., 2004):

$$\overline{w'\theta'} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (w_i(t) - \bar{w}) (\theta_i(t) - \bar{\theta}). \quad (2.13)$$

Daljnji koraci u analizi sustava osrednjjenih jednadžbi uključuju uvođenje određenih pretpostavki, poput horizontalne homogenosti tj. pretpostavke nepromjenjivosti nekog meteorološkog elementa u horizontali (tj. x i y smjeru: $\partial_x, \partial_y = 0$). Uvažavajući horizontalnu homogenost te zanemarujući Coriolisove članove, silu gradijenta tlaka i silu trenja dolazimo do sljedećeg sustava za ovaj rad relevantnih jednadžbi:

$$\frac{\partial \overline{u}}{\partial t} = -\frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z} + R_x, \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial \overline{v}}{\partial t} = -\frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial z} + R_y, \quad (2.15)$$

$$\frac{\partial \overline{\theta}}{\partial t} = -\frac{\partial \overline{w'\theta'}}{\partial z} + R_\theta. \quad (2.16)$$

Unutar članova R_x, R_y, R_θ sadržani su svi zanemareni doprinosi. U ovom radu nije promatrana pojednostavljena z komponenta jednadžbe gibanja.

Teorija turbulencije prvotno je izvedena za prostorna polja atmosferskih varijabli na ravnom,

homogenom terenu i u tom slučaju aproksimacija horizontalne homogenosti je opravdana. Horizontalna homogenost je nužna budući da su mjerena korištena u ovom radu vršena *in situ* odnosno na samo jednoj lokaciji, čime je nemoguće poznavati npr. polje strujanja vjetra u horizontalnoj ravnini.

2.2 Fourierova spektralna analiza i metoda ogiva

Pravilno provedena dekompizacija polja meteorološkog elementa na srednjak i perturbaciju (2.1) podrazumijeva postojanje lokalnog minimuma u Fourierovim spektrima snage promatranog elementa. Taj minimum pripada mezoskalnim procesima, za koje se pretpostavlja da ne daju značajan doprinos generiranju turbulentcije blizu Zemljine površine. Spomenuti minimum nalazi se u pravilu između dva maksimuma, od kojih onaj na višim frekvencijama (manjim periodima) pripada mikroskali, dok je onaj na nižim frekvencijama (većim periodima) tipičan za makroskalu i sinoptička gibanja.

Problem nalaženja prave vremenske skale osrednjavanja leži u dobrom prepoznavanju spomenutog minimuma u spektrima. Ukoliko se odabere prevelik iznos skale osrednjavanja dolazi do precjenjivanja turbulentnih gibanja te je čak moguće u razmatranja uzeti u obzir i fenomene na većoj skali. Uzimanjem premalene vremenske skale osrednjavanja dolazi do podcenjivanja turbulentnih parametara budući da neki za turbulentciju bitni fenomeni mogu biti u potpunosti zanemareni. Također, pokazuje se da skala osrednjavanja, osim što ovisi o promatranom fenomenu, pokazuje izrazitu ovisnost o samoj lokaciji na kojoj se vrše mjerena (npr. Metzger i Holmes, 2008).

Druga metoda određivanja vremenske skale osrednjavanja korištena u ovom radu je metoda ogiva (npr. Oncley i sur., 1996; Cañadillas i sur., 2011; Magjarević, 2011; Večenaj i sur., 2011; Babić i sur., 2012). Ogiva je definirana kao kumulativni integral kospektra kinematičkog turbulentnog toka impulsa ili topline:

$$Og_{pq}(f_0) = \int_{f_N}^{f_0} Co_{pq}(f) df \quad (2.17)$$

U jednadžbi (2.17) $Co_{pq}(f)$ predstavlja Fourierov kospektar bilo koje dvije veličine p i q . Ukoliko ogiva, počevši od Nyquistove frekvencije f_N prema nižim frekvencijama pokazuje konvergiranje ili ukoliko postiže ekstremnu vrijednost pri toj frekvenciji, za vremensku skalu osrednjavanja može se uzeti inverz te frekvencije, uz pretpostavku da kospektar $Co_{pq}(f)$ ima zanemariv doprinos turbulentnim fenomenima na nižim frekvencijama od f_0 . Metoda ogiva u ovom radu služi kao kontrola vremenske skale osrednjavanja dobivene samo na temelju Fourierovih spektara snage.

Nakon određivanja vremenske skale osrednjavanja turbulentnih gibanja opisanim spektralnim metodama, mogu se definirati turbulentne perturbacije brzine vjetra i temperature zraka. Pri-

mjenom odgovarajućeg blok osrednjavanja dolazi se do turbulentnih tokova impulsa i topline, koji su u ovom radu, između ostalog, korišteni i za proračun članova prognostičke jednadžbe turbulentne kinetičke energije (TKE).

2.3 Turbulentna kinetička energija, TKE

Turbulentna kinetička energija (u dalnjem tekstu TKE) predstavlja jednu od najvažnijih veličina mikrometeorologije. Ona predstavlja mjeru intenziteta turbulentnosti (npr. Stull, 1988). U svrhu opisivanja cjelokupnog turbulentnog strujanja, prikladnom se prikazuje koristiti TKE po jedinici mase:

$$\frac{TKE}{m} = \bar{e} = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}). \quad (2.18)$$

TKE se obično izražava u J kg^{-1} ili $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$. Osim samog iznosa TKE, korisnim se pokazuje proučavanje i evolucije TKE u vremenu, koja je opisana sljedećom prognostičkom jednadžbom (u Einsteinovoj notaciji sumacije):

$$\frac{\partial \bar{e}}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{e}}{\partial x_j} = \delta_{i3} \frac{g}{\theta_v} (\overline{u'_i \theta'_v}) - \overline{u'_i w'_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \frac{\partial \overline{u'_j e}}{\partial x_j} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \overline{u'_i p'}}{\partial x_i} - \epsilon, \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (2.19)$$

U (2.19) g predstavlja akceleraciju sile teže, θ_v virtualnu potencijalnu temperaturu, ρ_0 gustoću česti zraka te ϵ viskoznu disipaciju (dissipacija TKE molekularnom viskoznošću u toplinu). Također, ta jednadžba predstavlja jednu od glavnih jednadžbi korištenih u numeričkim modelima za parametrizaciju TKE.

Ukoliko primjenimo standardnu pretpostavku o horizontalnoj homogenosti turbulentnosti i zanemarimo član redistribucije tlakom (zbog nemogućnosti finog mjerjenja tlaka), (2.19) se svodi na:

$$\underbrace{\frac{\partial \bar{e}}{\partial t}}_{\text{I}} = - \underbrace{\bar{w} \frac{\partial \bar{e}}{\partial z}}_{\text{II}} + \underbrace{\frac{g}{\theta_v} (\overline{w' \theta'_v})}_{\text{III}} - \underbrace{\left[\overline{u' w'} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} + \overline{v' w'} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} + \overline{w' w'} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right]}_{\text{IV}} - \underbrace{\frac{\partial \overline{w' e}}{\partial z}}_{\text{V}} - \epsilon + R \quad (2.20)$$

Članovi u jednadžbi ravnoteže TKE (2.20) predstavljaju, redom:

- I ... lokalna promjena TKE;
- II ... advekcija TKE srednjim vjetrom;
- III ... termičko-uzgonska produkcija/destrukcija;
- IV ... dinamičko-mehanička produkcija smicanjem;
- V ... turbulentni transport TKE.

Unutar izraza R (tzv. rezidualni član) nalaze se svi zanemareni članovi. S druge strane, svi članovi (izuzev bilo advekcije bilo transporta TKE) doprinose lokalnom generiranju i/ili destrukciji TKE. Problem pravilnog zatvaranja jednadžbe (2.20) leži u opravdanosti primjenjenih pretpostavki na danu lokaciju i period mjerjenja, odnosno u procjeni ukupnog doprinosa rezidualnog člana R lokalnoj promjeni TKE. Kao što će se pokazati u dalnjem tijeku rada, taj doprinos može biti značajan.

2.4 Viskozna disipacija, ϵ

Jedini član u jednadžbi ravnoteže TKE (2.20) koji se ne može izravno računati je član viskozne disipacije ϵ . Proračun ϵ temelji se na spektralnoj analizi te je usko vezan uz izotropiju turbulentnih gibanja (npr. Biltoft, 2001; Večenaj i sur., 2011).

U ovom radu za procjenu viskozne disipacije korištena je metoda inercijalne disipacije (engl. *Inertial Dissipation Method*, IDM)(npr. Tennekes i Lumely, 1972). Suština te metode leži u činjenici da bi Fourierovi spektri snage komponenti brzine vjetra u logaritamskoj reprezentaciji trebali pratiti nagib pravca s koeficijentom smjera $-5/3$ unutar inercijalnog potpodručja (energijsko područje u kojem turbulentni vrtlozi spontano pucaju te time prenose energiju na progresivno sve manje vrtloge) u logaritamskoj reprezentaciji. Budući da postojanje inercijalnog potpodručja u spektrima ne mora uvijek biti očito, u svrhu provjere moguće je gledati omjere Fourierovih spektara snage transverzalne i longitudinalne, odnosno vertikalne i longitudinalne komponente brzine (nakon uobičajenog rotiranja koordinatnog sustava). Ukoliko ti omjeri, idući progresivno ka sve višim frekvencijama, teže iznosu $4/3$, pretpostavlja se da inercijalno potpodručje postoji (npr. Batchelor, 1959). To je jedan od neintuitivnih rezultata dinamike fluida.

Za daljnji proračun viskozne disipacije IDM koristi hipotezu Kolmogorova iz 1941. (npr. Tennekes i Lumely, 1972), po kojoj u inercijalnom potpodručju u prostornoj domeni vrijedi:

$$S_u(k) = \alpha_u \epsilon^{2/3} k^{-5/3}, \quad (2.21)$$

gdje $S_u(k)$ predstavlja Fourierov spektar snage longitudinalne komponente brzine vjetra, α_u je odgovarajuća Kolmogorova konstanta (u ovom radu se uzima vrijednost 0.53, npr. Večenaj i sur., 2010; Večenaj i sur., 2012), ϵ je viskozna disipacija dok je k valni broj. Logaritmiranjem (2.21) slijedi:

$$\log S_u(k) = -5/3 \log k + \log(\alpha_u \epsilon^{2/3}). \quad (2.22)$$

U (2.22) vidi se spomenuta linearna ovisnost (pravac koeficijenta smjera $-5/3$). Grupiranjem i sređivanjem izraza (2.21) slijedi željeni izraz za ϵ :

$$\epsilon = \left(\frac{k^{5/3} S_u(k)}{\alpha_u} \right)^{3/2}. \quad (2.23)$$

Budući da se u ovom radu koriste podaci u obliku vremenskih nizova, potrebno je koristiti alternativnu verziju (2.23) koja u sebi sadrži frekvenciju umjesto valnog broja. Međutim, da bi transformacija iz prostorne u vremensku domenu bila opravdana, podaci moraju zadovoljavati Taylorovu hipotezu o zamrznutoj turbulentnosti (npr. Stull, 1988), koja daje zahtjev na omjer standardne devijacije i srednjaka longitudinalne (tj. one niz vjetra) komponente brzine vjetra:

$$\frac{\sigma_u}{\bar{u}} \leq 0.5 \quad (2.24)$$

Konačni izraz za viskoznu disipaciju, dobivenu metodom inercijalne disipacije, glasi:

$$\epsilon = \frac{2\pi}{\bar{u}} \left(\frac{f^{5/3} S_u(f)}{\alpha_u} \right)^{3/2} \quad (2.25)$$

2.5 Parametrizacija viskozne disipacije

Budući da matematičke jednadžbe koje se koriste za opis turbulencije nisu zatvorene tj. kompletne, koriste se odredene sheme, tzv. metode zatvaranja određenog reda, pomoću kojih se turbulencija parametrizira za potrebe numeričkog modeliranja. Primjer takvog zatvaranja je ona reda 1.5, pri čemu se viskozna disipacija može parametrizirati pomoću TKE na sljedeći način:

$$\epsilon = a \frac{\text{TKE}^{1.5}}{\Lambda}. \quad (2.26)$$

U (2.26) Λ predstavlja empirijsku skalu duljine koja služi i za opis veličine turbulentnih vrtloga u numeričkim modelima (npr. Mellor i Yamada, 1974), dok je a konstanta reda veličine 1. Relacija (2.26) vrijedi za homogenu turbulenciju.

3 Podaci

3.1 Lokacija mjernog tornja

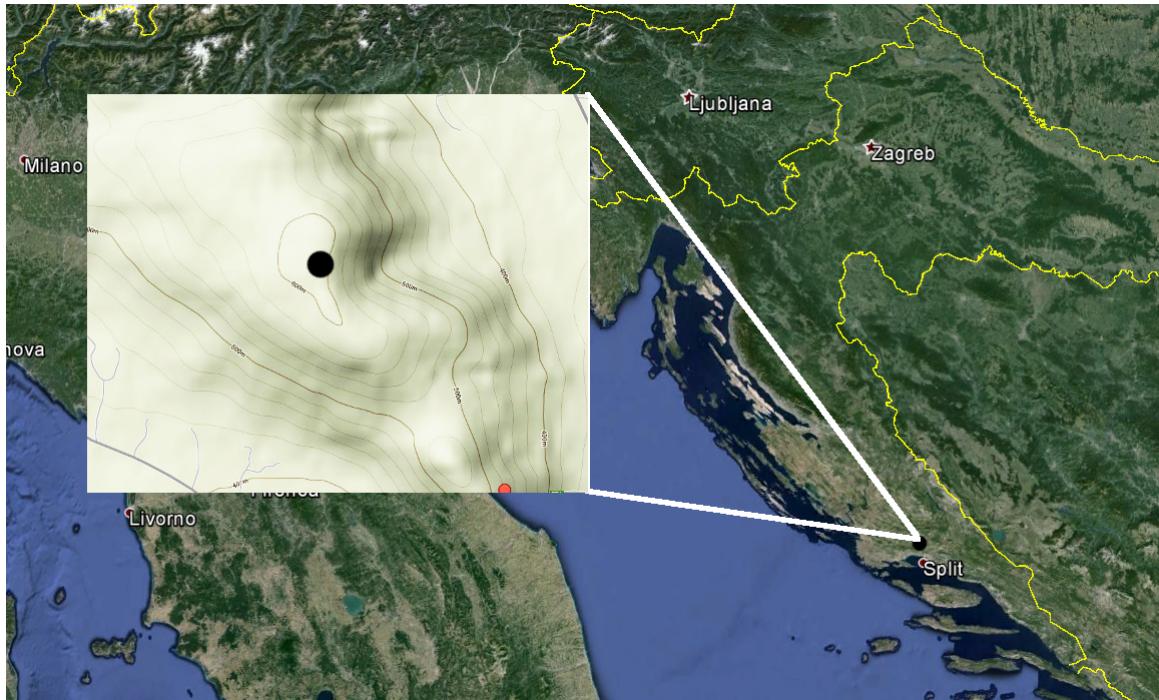
Mjerenja korištena u ovom radu vršena su na Pometenom brdu ($43^{\circ}36' N$, $16^{\circ}28' E$), nedaleko Dugopolja u zaleđu grada Splita. Mjerni toranj je bio operativan u razdoblju od travnja 2010. do lipnja 2011. godine. Cilj je bio "uhvatiti" buru srednjeg Jadrana u svim sezonama.

Izuzev teorijskog istraživanja bure, mjerenja ovog tipa omogućuju i istraživanje vjetroenergetskog potencijala određene lokacije. Konkretna lokacija Pometenog brda je odabранa, osim zbog svoje blizine ogranku jadransko-jonske autoceste te Splitu (drugom po veličini gradu u Hrvatskoj i administrativnom središtu splitsko-dalmatinske županije), zahvaljujući činjenici da je šire područje Splita drugo po redu u smislu najjačih i najučestalijih udara bure, odmah iza Senja (npr. Orlić i sur., 1994; Makjanić, 1978) (slika 1).



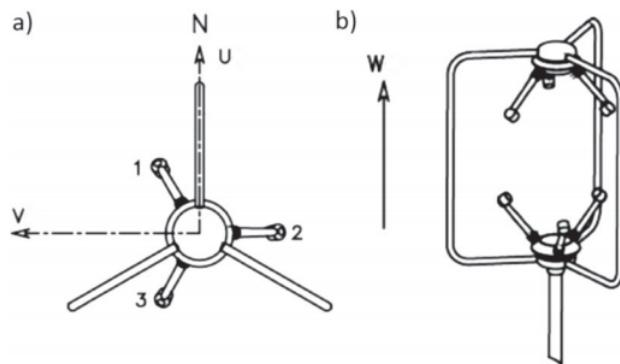
Slika 1: Jačine bure i srednji smjerovi iste duž istočne obale Jadranskog mora. Plavi kružić označava lokaciju Pometenog brda.

Položaj Pometenog brda u Hrvatskoj i okolna orografska prikazani su na slici 2. Vidljiva je približna okomitost samog brda na srednji smjer puhanja bure (NE-SW), što je dodatno pogodavalo odabiru ove lokacije.



Slika 2: Satelitski prikaz Jadranskog mora (izvor: Google Earth); uvećani prozor prikazuje topografiju i izohipse u okolini mjernog tornja. Crni kružić prikazuje točan položaj samog tornja.

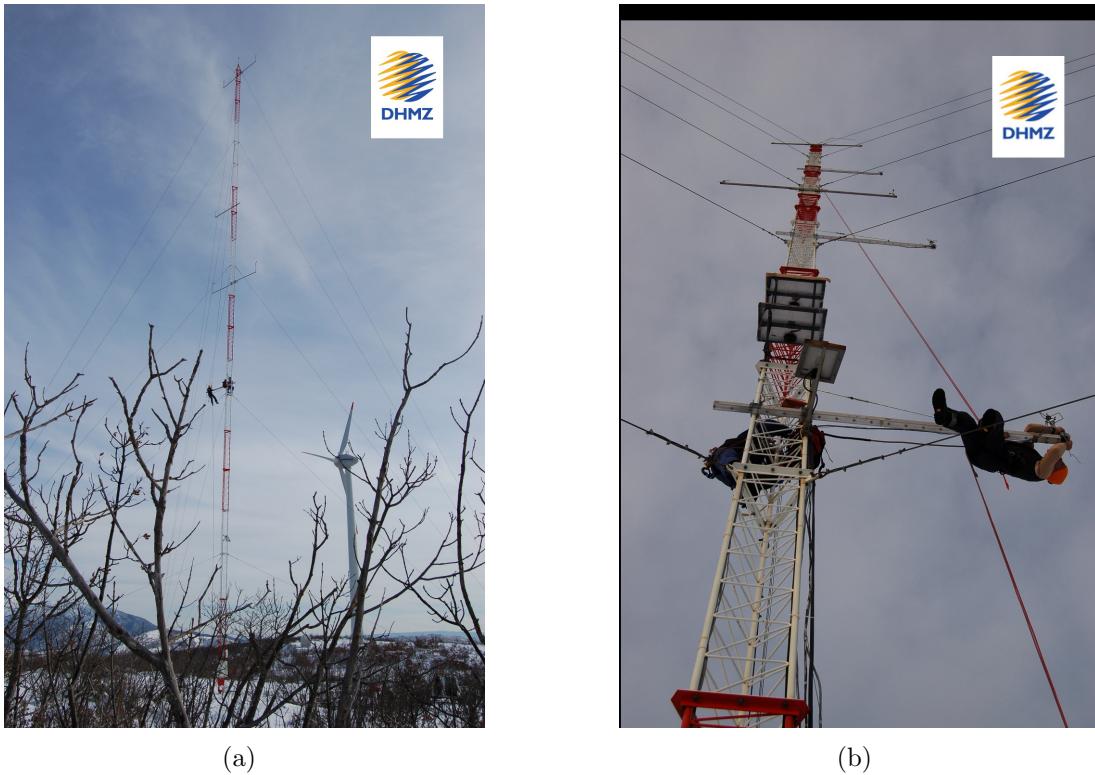
Mjerni toranj s instrumentima je bio postavljen na vrh Pometenog brda (≈ 600 m nadmorske visine). Na toranj su na tri visine (10, 20 i 40 m iznad razine tla) bili instalirani po jedan "WindMaster Pro" ultrasonični anemometar (*Gill Instruments*), koji su mjerili 3D brzinu vjetra i soničnu temperaturu s frekvencijom uzorkovanja od 5 Hz. Zbog specifičnosti vlastitog koordinatnog sustava anemometra s apscisom orijentiranom prema sjeveru i ordinatom prema zapadu (slika 3), pri obradi podataka je bilo potrebno izvršiti transformaciju u standardan desni koordinatni sustav ($u = -V$, $v = U$, $w = W$, poštujući 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 vjetra.

Visine 10, 20 i 40 m su odabrane s ciljem što vjernijeg reproduciranja logaritamskog profila vjetra, tipičnog za horizontalan atmosferski prizemni sloj. Mjerni toranj i okolni teren prikazani su

na slici 4. Podloga u blizini tornja je karaktera tipičnog za priobalje Jadrana, uz prevladavajući kamenjar te biljni pokrov najvećim dijelom u obliku niske šikare i raslinja ne višeg od 3 m (npr. slika 4a).



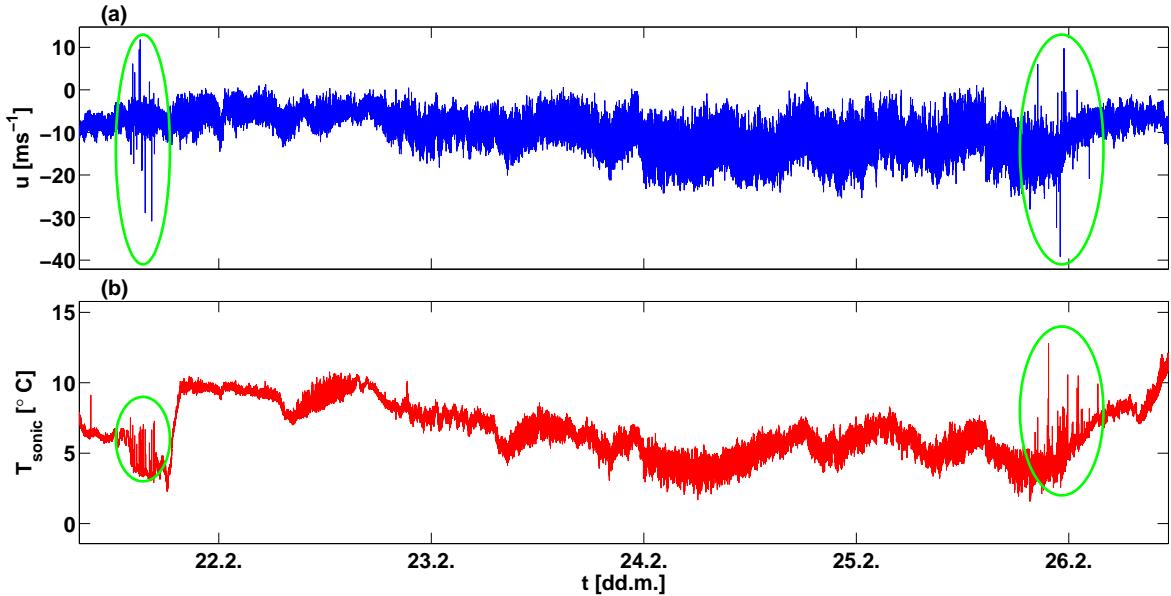
Slika 4: Montiranje i priprema mjernog tornja krajem 2009. godine: (a) mjerni toranj slikan s tla, u usporedbi s okolnim vjetrenjačama; (b) montiranje anemometara na aluminijske krakove duljine 2 m kako bi utjecaj tornja na sama mjerena bio sveden na minimum.

3.2 Kontrola kvalitete podataka

U ovom radu koriste se podaci 3D brzine vjetra i sonične temperature s mjernog tornja na Pometenom brdu na tri visine (10, 20 i 40 m) u razdoblju od 1. siječnja 2011. do 31. ožujka 2011. godine (razdoblje od 90 dana) u svrhu istraživanja turbulentije zimske bure.

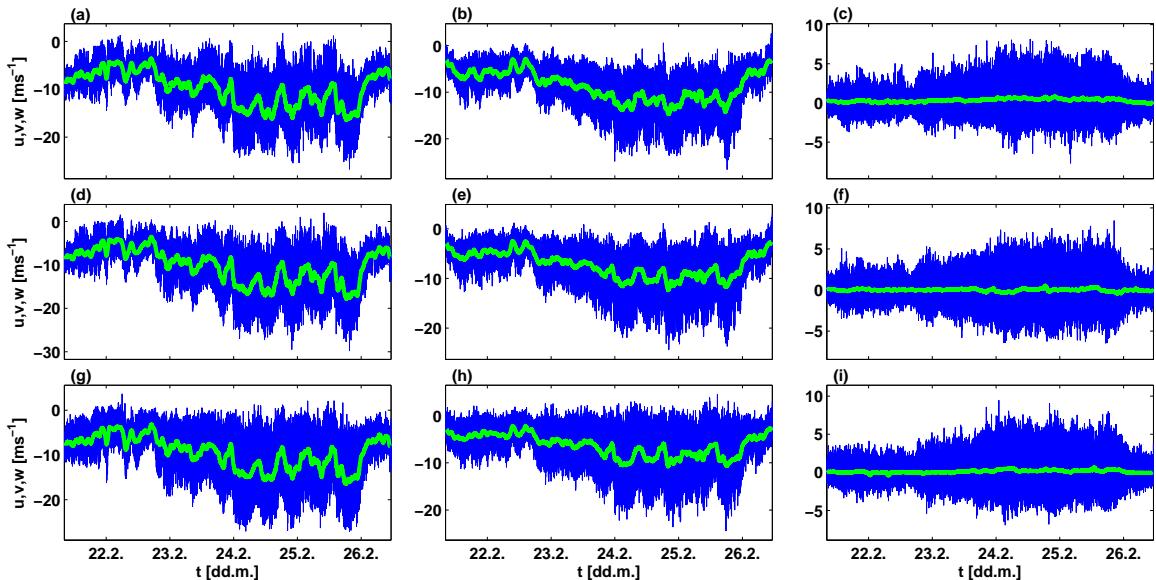
Prilikom rada s digitalnim instrumentima, uvijek postoji mogućnost pogrešnog očitanja na instrumentu (uzroci mogu biti razni, npr. kvar na instrumentu, slučajne pogreške, sustavne pogreške, itd.). Zbog toga je nad svakim takvim skupom podataka, prije analize istih, potrebno izvršiti kontrolu kvalitete podataka (eng. *quality check*) (npr. Pandžić, 2002).

Kao što je vidljivo na slici 5, pojavljuju se određeni podaci (eng. *outliers*) koji odudaraju od globalnog ponašanja niza (npr. individualni nagli i iznenadni skokovi u brzini bure i očitanju sonične temperature krajem 25. veljače). Takve je podatke potrebno ukloniti bilo ručno, bilo nekom automatskom računalnom metodom. U ovom radu takvi su podaci uklonjeni ručno.



Slika 5: Grafički prikaz neobrađenih podataka na 40 m za period veljače 2011.: a) u komponenta brzine vjetra (uvažena transformacija u standardni desni koordinatni sustav); b) sonična temperatura. Zelenom bojom su uokvireni *outlieri*.

Sve izbačene podatke bilo je potrebno linearno interpolirati kako bi vremenski nizovi bili potpuni i spremni za daljnju obradu (slika 6 prikazuje takav *procvišćen* skup podataka).



Slika 6: Prikaz komponenti brzine vjetra za najdužu epizodu bure (tablica 1, bura #9). Slijeva nadesno, (a, b, c) predstavljaju u , v i w komponentu brzine na 40 m, (d, e, f) predstavljaju iste komponente brzine na 20 m te (g, h, i) predstavljaju iste komponente brzine na 10 m visine. Pri tome u i v su horizontalne komponente brzine, dok je w vertikalna komponenta brzine (uvažena transformacija u standardni desni koordinatni sustav). Zelena linija predstavlja 1-satni klizni srednjak.

Nakon obavljene kontrole kvalitete podataka može se pristupiti obradi i analizi istih, tj. definiranju kriterija za bure te izdvajaju epizoda bure na temelju tih kriterija.

3.3 Kriteriji za definiciju bure

Nakon kontrole kvalitete podataka, iz odabranog tromjesečnog niza podataka o brzini vjetra i temperature zraka na tri visine potrebno je izdvojiti epizode bure, budući da nas u ovom radu ne zanimaju ostali fenomeni tipični za područje Jadrana, npr. jugo ili maestral. U ovom radu za definiranje epizode bure korištena su dva osnovna kriterija:

- 10-minutni srednjaci smjera vjetra moraju biti unutar intervala kutova $[25^\circ, 85^\circ]$, što odgovara sjeveroistočnom smjeru puhanja bure;
- vjetar tako definiranog smjera mora puhati u trajanju od barem 10 h.

Na temelju samo ova dva kriterija izdvojeno je 17 *zimskih* epizoda bure tijekom promatranog tromjesečnog razdoblja s početka 2011. godine. Treba napomenuti da je u svrhu što lakše daljnje obrade podataka svaka bura skraćena (po potrebi) na cijeli broj sati. Tablica 1 daje podrobnije detalje o konačnih 17 epizoda bure.

Budući da se pri obradi podataka u svrhu opisa turbulencije obično vrši rotacija koordinatnog sustava na način da apscisa bude paralelna s longitudinalnom komponentom brzine vjetra (ona ujedno nosi i najveći dio varijance vjetra), isto je provedeno i za izdvojenih 17 epizoda bure, pri čemu je za pojedini kut rotiranja uzeta vrijednost smjera srednjeg horizontalnog vjetra dobivena interpolacijom na visini 25 m (međunivo između 10 i 40 m, npr. Večenaj, 2012).

Tablica 1: Osnovna statistika svih 17 registriranih epizoda bure trajanja duljeg od 10 h za period mjerena od 1. siječnja do 31. ožujka 2011. godine na Pometenom brdu. Za svaku pojedinu visinu dani su vrijeme početka i kraja epizode bure (po lokalnom vremenu), trajanje iste, te srednja horizontalna brzina i najbrži opaženi udar.

kronologija epizode bure			10 m		20 m		40 m		
#	početak	kraj	trajanje(h)	$v_{sred}(\text{m s}^{-1})$	$v_{max}(\text{m s}^{-1})$	$v_{sred}(\text{m s}^{-1})$	$v_{max}(\text{m s}^{-1})$	$v_{sred}(\text{m s}^{-1})$	$v_{max}(\text{m s}^{-1})$
1	02.1., 22:25	04.1., 10:25	36	9.3	27.1	9.8	27.2	10.5	27.3
2	20.1., 07:55	23.1., 13:55	78	13.7	33.7	14.2	33.6	14.4	32.5
3	27.1., 00:05	27.1., 11:05	11	6.9	16.2	7.2	13.8	7.5	13.7
4	27.1., 18:05	29.1., 11:05	41	8.3	17.8	8.7	16.3	8.9	15.9
5	02.2., 13:25	03.2., 16:25	27	10.5	24.0	11.5	24.0	11.9	23.9
6	03.2., 17:45	04.2., 10:45	17	10.3	26.3	11.8	26.9	12.5	25.9
7	18.2., 01:45	18.2., 12:45	11	5.7	12.9	6.1	13.3	6.3	12.9
8	18.2., 17:55	19.2., 18:55	25	9.4	20.8	10.6	21.5	11.3	22.6
9	21.2., 08:15	26.2., 11:15	123	11.5	31.9	12.7	33.0	13.3	32.0
10	01.3., 00:45	01.3., 10:45	10	7.5	14.2	8.2	13.9	8.6	14.8
11	03.3., 20:15	04.3., 10:15	14	5.8	13.4	6.2	13.3	6.3	14.0
12	04.3., 18:35	05.3., 07:35	13	4.3	9.1	4.6	9.9	4.9	8.6
13	06.3., 17:05	07.3., 04:05	11	14.6	30.7	16.3	32.4	17.2	30.7
14	08.3., 01:25	08.3., 14:25	13	10.4	24.3	11.4	23.8	11.7	28.5
15	19.3., 00:05	22.3., 08:05	80	11.2	27.4	12.3	28.3	13.3	28.5
16	22.3., 16:25	23.3., 04:25	12	7.0	16.7	8.0	16.0	8.4	15.9
17	23.3., 16:35	24.3., 09:35	17	7.7	18.6	8.6	19.9	9.2	19.5

4 Rezultati i diskusija

4.1 Određivanje vremenske skale osrednjavanja

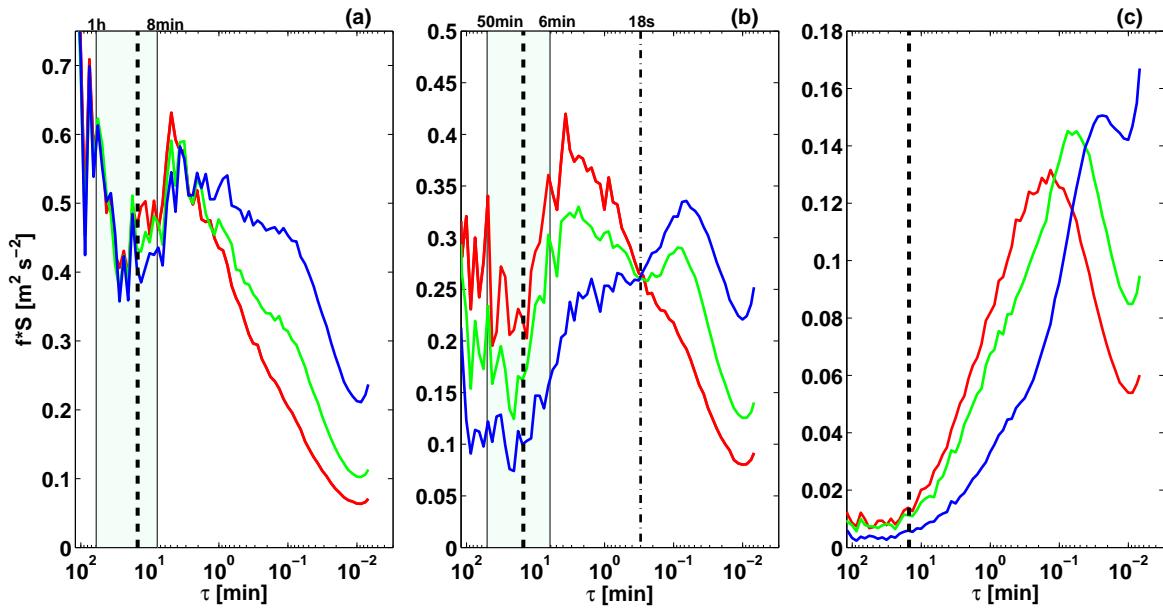
4.1.1 Spektri komponenti brzine vjetra

U svrhu definiranja turbulentnih perturbacija brzine vjetra i temperature, potrebno je provesti Fourierovu spektralnu analizu takvih podataka. U ovom radu korištena je diskretna forma Fourierovog transforma (eng. *Fast Fourier Transform*). Takav transform je proveden na svih 17 izdvojenih epizoda bure.

Ovisno o duljini pojedine epizode (svaki sat u sebi sadrži 18000 podataka: $5 \text{ Hz} \times 60 \text{ s} \times 60 \text{ min}$) korišteni su prozori različitih duljina, prilikom čega je svaka duljina prozora definirana u obliku potencije s bazom 2 (u svrhu smanjenja vremena potrebnog za računanje transforma). Na ovaj način dobiveni su prozori duljine od $2^{17} = 131072$ podataka za najkraće bure (trajanja kraćeg od 14 h) do $2^{21} = 2097152$ podataka za najdužu buru (trajanja duljeg od 117 h). Dakle, potencije su određene na takav način da duljina prozora bude maksimalna moguća te istovremeno ne veća od broja podataka pojedine epizode bure. Ovakav pristup računanju transforma je odabran kako bi se što lakše zapazio spektralni procjep u tako dobivenim spektrima snage komponenti brzine vjetra.

Imajući u vidu što bolju vizualnu predodžbu za prepoznavanje spektralnog procjepa, svi spektari su "izglađeni" dijeljenjem logaritamske skale na uniformne dekade (konkretno, za sve bure korišteno je 16 dekada) unutar kojih su smještene usrednjene vrijednosti spektara. Također, spektari su pomnoženi s frekvencijom jer takvi otežani spektari imaju za ovaj rad poželjno svojstvo: površina ispod bilo kojeg dijela spektralne krivulje je proporcionalna varijanci odnosno energiji koju nosi dotična komponenta brzine vjetra (npr. Stull, 1988).

Na spektrima snage longitudinalne (u) i lateralne (v) komponente brzine vjetra uočen je spektralni procjep vrlo sličnog položaja i reda veličine na svih 17 epizoda bure. Zahvaljujući tome, napravljen je srednjak spektara svih 17 epizoda bure (slika 7).



Slika 7: Log-lin prikaz usrednjениh spektara snage vjetra za sve tri visine: (a) spektar S_u ; (b) spektar S_v ; (c) spektar S_w . Crvena linija predstavlja spektar snage na 40 m, zelena linija na 20 m te plava linija na 10 m visine. Osjenčano područje predstavlja širinu spektralnog procjepa. Crna crta-točka linija predstavlja period od 15 min. Crna crta-točka linija predstavlja period od 18 s.

Na slici 7 vidljiv je spektralni procjep na spektrima u i v komponenti brzine (u intervalu perioda naznačenom iznad slike), što je za slučaj bure na Pometenom brdu u suglasnosti s drugim radovima na temu traženja prikladne vremenske skale osrednjavanja (npr. Večenaj, 2012).

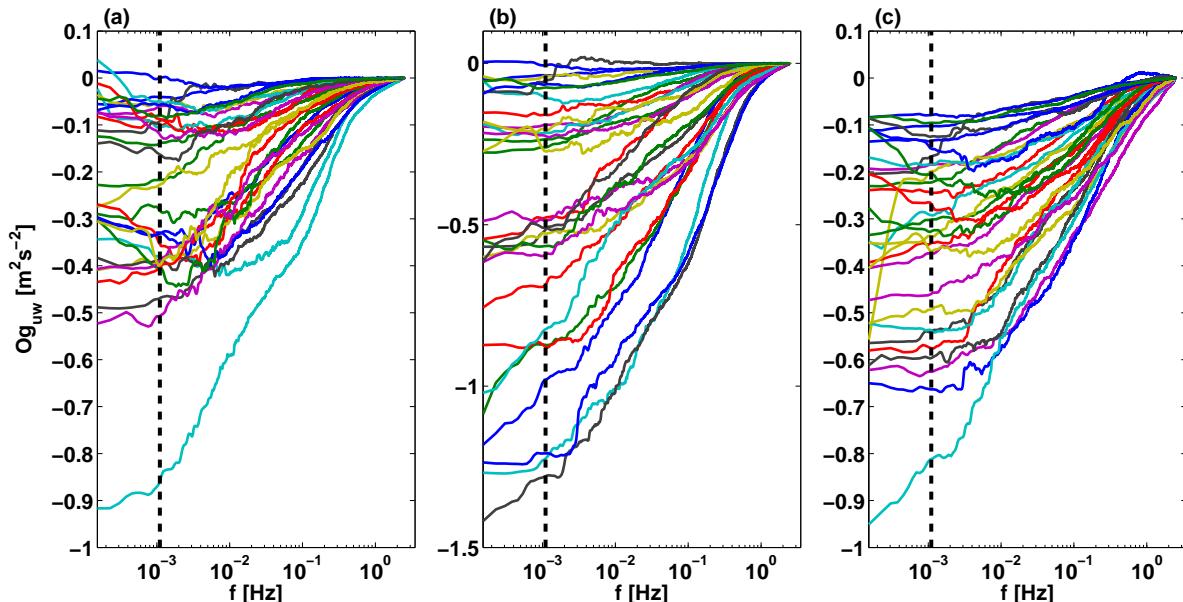
Valja obratiti pozornost na redove veličina na ordinati: spektar u komponente brzine S_u nosi najveći postotak energije, spektar S_v gotovo dvostruko manje, dok spektar vertikalne komponente brzine S_w nosi najmanje energije, što ukazuje na činjenicu da bure na ovoj lokaciji nije u potpunosti izotropna (štoviše, zbog malog udjela energije u spektru vertikalne brzine, može se reći da je strujanje donekle *horizontalno polarizirano*). Maksimum spektra S_u na ≈ 5 min i onaj spektra S_v na ≈ 4 min se mogu pripisati pulsacijama bure (npr. Belušić i sur., 2006; Belušić i sur., 2007).

Na spektru S_v valja izdvojiti očito presjecište triju krivulja na ≈ 18 s, tj. promjenu međusobnog odnosa spektara na 10 i 40 m. Razlog ovog fenomena nije trenutno razjašnjen i ostaje mogućim predmetom daljnog istraživanja.

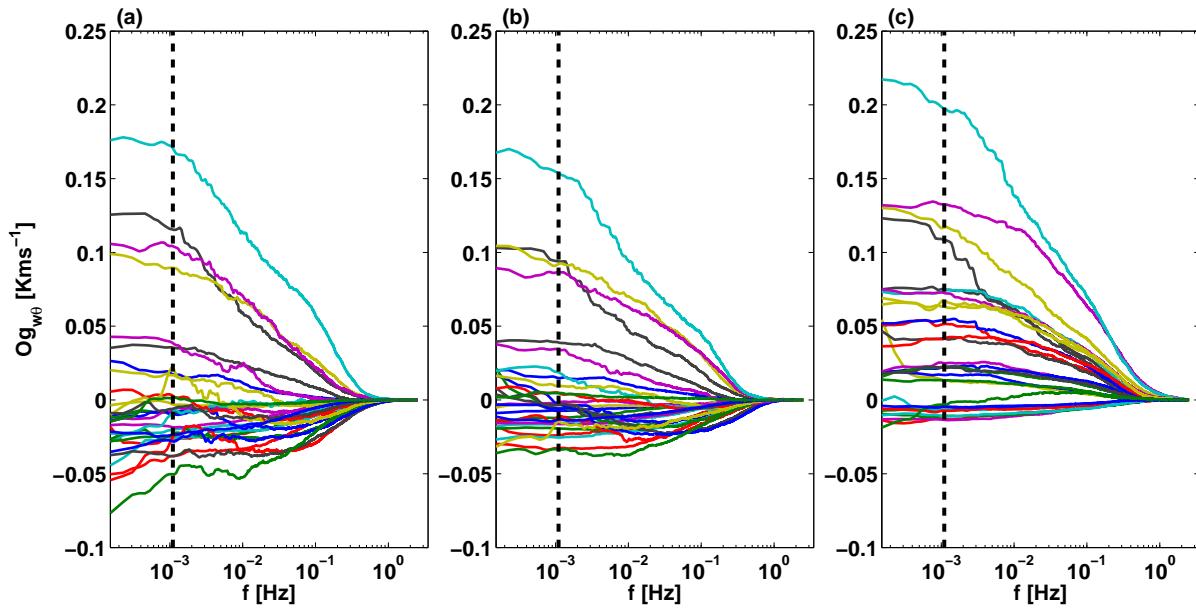
4.1.2 Ogive turbulentnih tokova

U svrhu definiranja kospektara turbulentnih tokova impulsa $\overline{u'w'}$ i topline $\overline{w'\theta'}$ svaka epizoda bure podijeljena je na 4-satne segmente (ovdje su korišteni prozori duljine $2^{16} = 65536$ podataka uz 50% preklapanja) te je za pojedini segment kumulativnom trapeznom relacijom izračunat integral ogive (2.17). Na slikama 8 do 11 prikazane su krivulje ogiva za pojedine turbulentne tokove za dvije epizode bure (slično ponašanje ogiva uočeno je i kod ostalih epizoda tako da su u svrhu reprezentacije prikazane ogive samo ovih dviju epizoda bure).

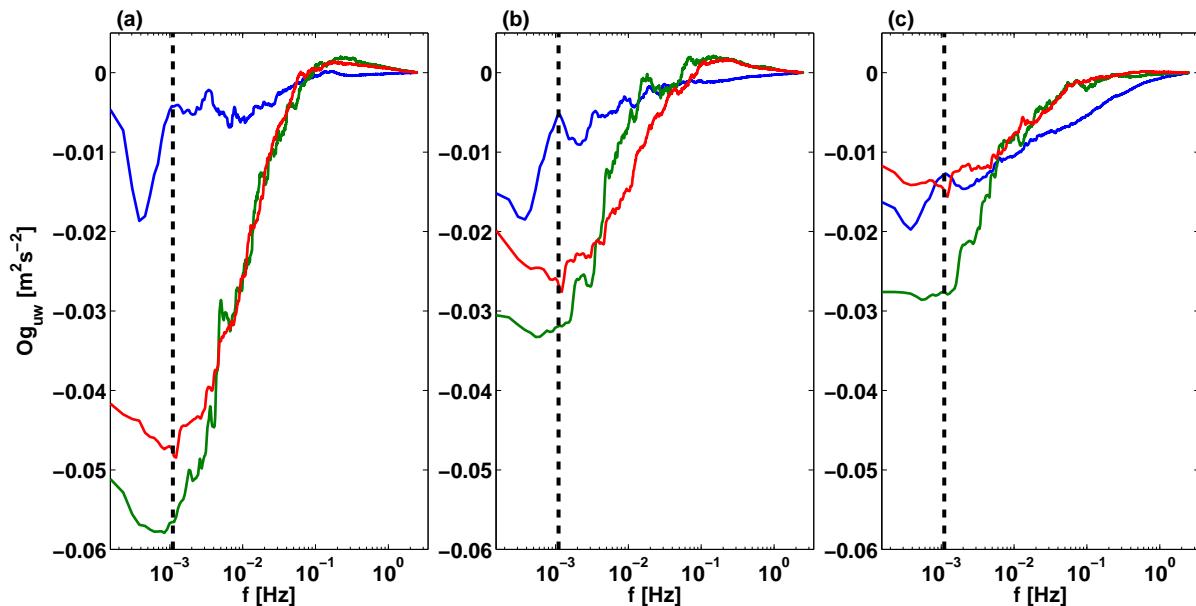
Prikazane su ogive za dvije ekstremne epizode bure: bura #9 kao najduža i jedna od najintenzivnijih te bura #12 kao jedna od najkraćih bura koja je ujedno i najslabija (tablica 1). Dulje bure se pokazuju poželjnima u promatranju ogiva (sadrže velik broj takvih segmenata) pošto je pri radu s ogivama bitno gledati njihovo kolektivno ponašanje (brojniji uzorci općenito jamče statistički značajnije rezultate).



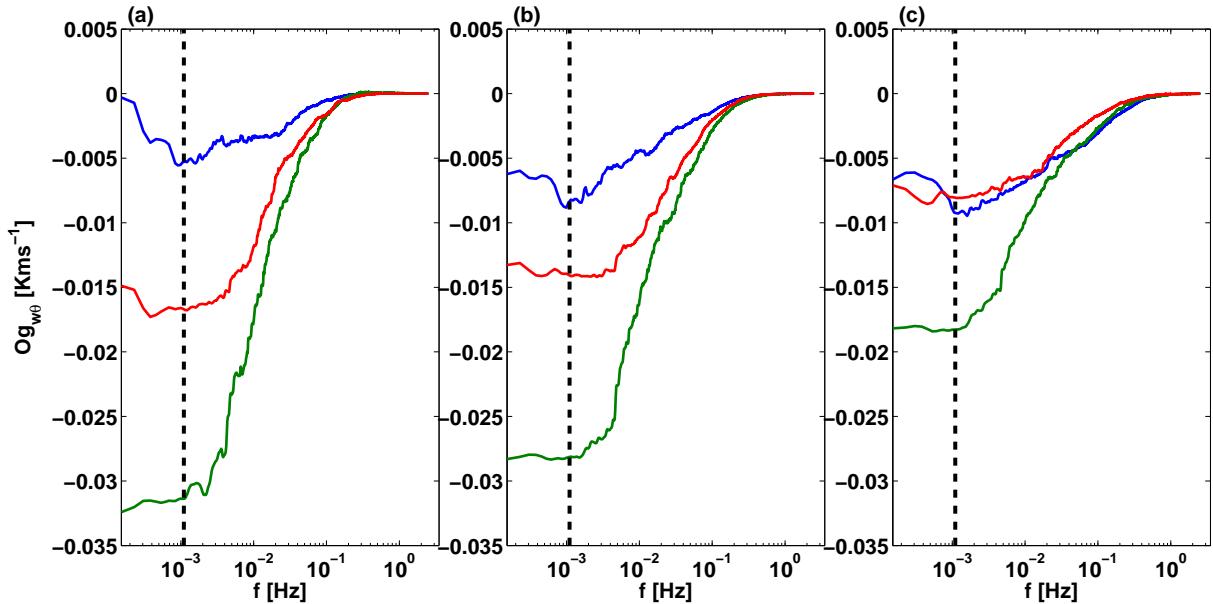
Slika 8: Log-lin prikaz ovisnosti ogive kospektra turbulentnog toka impulsa o frekvenciji za buru #9 na visinama (a) 40 m, (b) 20 m te (c) 10 m visine. Različite krivulje predstavljaju integrale ogiva pojedinog 4-satnog segmenta (boje krivulja se ponavljaju zbog ograničenog broja predefiniranih boja u programskom paketu MATLAB). Crna crtačana linija predstavlja period od 15 min.



Slika 9: Log-lin prikaz ovisnosti ogive kospektra turbulentnog toka topoline o frekvenciji za buru #9 na visinama (a) 40 m, (b) 20 m te (c) 10 m visine. Različite krivulje predstavljaju integrale ogiva pojedinog 4-satnog segmenta (boje krivulja se ponavljaju zbog ograničenog broja predefiniranih boja u programskom paketu MATLAB). Crna crtkana linija predstavlja period od 15 min.



Slika 10: Log-lin prikaz ovisnosti ogive kospektra turbulentnog toka impulsa o frekvenciji za buru #12 na visinama (a) 40 m, (b) 20 m te (c) 10 m visine. Različite krivulje predstavljaju integrale ogiva pojedinog 4-satnog segmenta. Crna crtkana linija predstavlja period od 15 min.



Slika 11: Log-lin prikaz ovisnosti ogive kospektra turbulentnog toka topline o frekvenciji za buru #12 na visinama (a) 40 m, (b) 20 m te (c) 10 m visine. Različite krivulje predstavljaju integrale ogiva pojedinog 4-satnog segmenta. Crna crtkana linija predstavlja period od 15 min.

Počevši od Nyquistove frekvencije (2.5 Hz) pa prema nižim frekvencijama, uočava se postupan razvoj ogiva do (u pravilu) perioda od 15 min. Nakon tog praga, ogive prestaju konvergirati, što znači da fenomeni na tim vremenskim skalama (makroskala i mezoskala) više ne doprinose značajnije turbulentnim tokovima impulsa i topline. Unutar pojedine epizode, vidljivo je općenito slabije fluktuiranje ogiva sa smanjenjem visine (posebice uočljivo na slici 9). Očito je i izraženije konvergiranje ogive kospektra turbulentnog toka topline od one kospektra turbulentnog toka impulsa.

Uzveši u obzir sliku 7 vidi se da se spomenuti period od 15 min nalazi unutar spektralnog procjepa na spektrima S_u i S_v . U skladu s ovim dvjema metodama, za konačnu vrijednost vremenske skale osrednjavanja u ovom radu se uzima vrijednost od 15 min, što se slaže i s drugim radovima koji uključuju podatke s Pometenog brda: npr. Magjarević (2011) je za slučaj ljetne bure (također na temelju ogiva) odredio vremensku skalu osrednjavanja od (17 ± 3) min, dok je npr. Večenaj (2012) koristio vrijednost od 14 min.

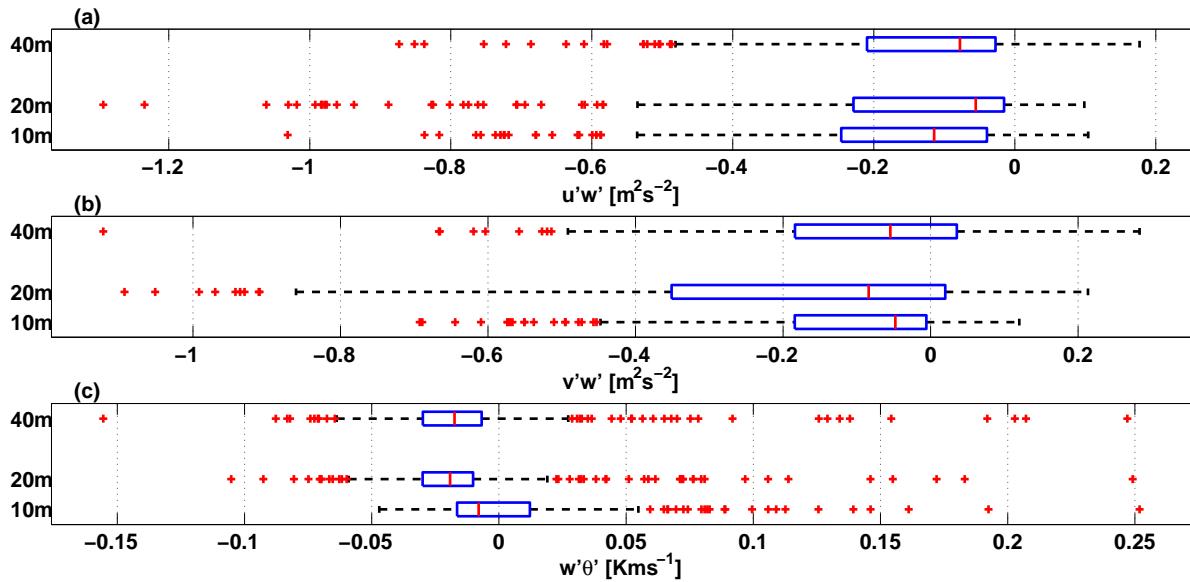
4.2 Turbulentni tokovi

Optimalna vrijednost vremenske skale osrednjavanja turbulentnih gibanja za buru na Pometenom brdu, temeljena na spektralnoj analizi brzine vjetra, omogućuje provođenje Reynoldsovog osrednjavanja te definiranje turbulentnih perturbacija u' , v' , w' , θ' . One su ovdje izračunate oduzimanjem 15-minutnog kliznog srednjaka pripadne varijable od same vrijednosti iste varijable (jednadžba (2.1)). Turbulentni tokovi impulsa i topline definirani su kao kovarijance turbulentnih perturbacija brzina, odnosno brzine i potencijalne temperature (poglavlje 2.). Kako bi se zadržala vremenska komponenta "dinamike" ponašanja i varijabilnosti tokova, ali i smanjilo vrijeme potrebno za proračune, napravljen je *kompromis* u odabiru duljine blok osrednjavanja u iznosu $T = 30$ min po bloku (vizualnom usporedbom 1-satnih i 30-minutnih srednjaka je ustanovljeno da je sasvim opravdano koristiti potonje, budući da sadrže detaljniju vremensku varijabilnost te ih količinski ima dvostruko više).

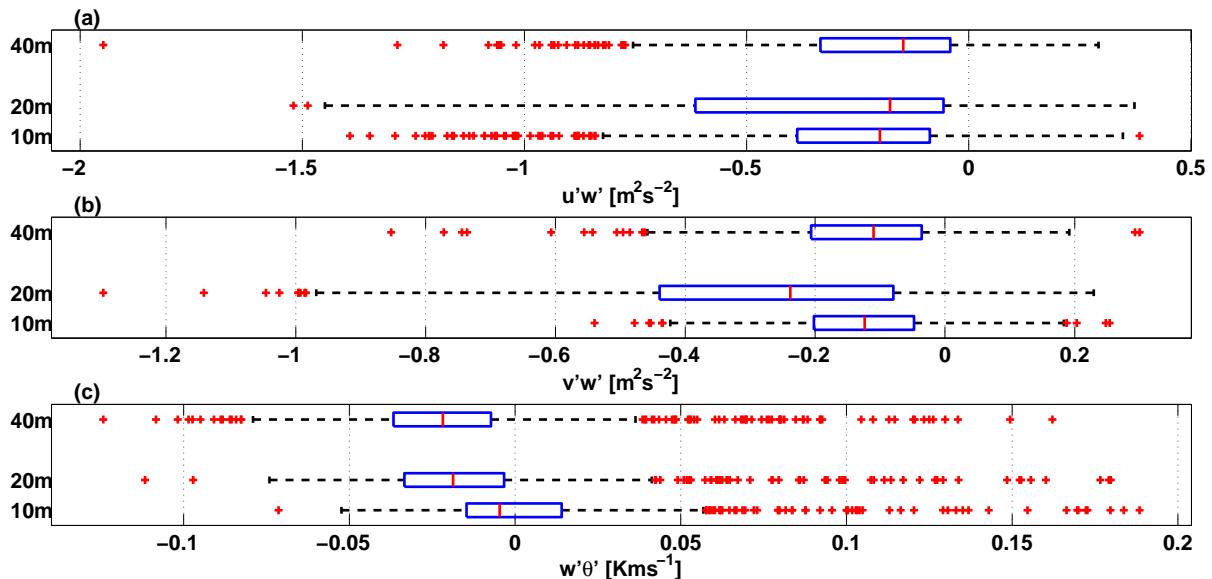
4.2.1 Promjenjivost turbulentnih tokova s visinom

Kako bi se ispitala teza o promjenjivosti turbulentnih tokova s visinom u prizemnom sloju (npr. Stull, 1988), epizode bure su podijeljene u tri klase na temelju svog trajanja. Budući da ukupno trajanje svih 17 epizoda bure iznosi 539 h, ukupan broj 30-minutnih srednjaka iznosi 1078 te je sva daljnja statistika gledana u smislu uzoraka takvih srednjaka. Na ovaj način dobivene su klase bure kratkog trajanja (10-24 h, 258 srednjaka), srednjeg trajanja (25-81 h, 574 srednjaka) te samo jedna bura najdužeg trajanja (bura #9, 246 srednjaka, tablica 1). Ovakva podjela je provedena kako bi ukupan broj srednjaka bio što pravilnije raspoređen na tri dijela, dok svaka druga (pogotovo finija podjela) ne bi imala smisla budući da pojedine bure unutar takvih klasa pokazuju sasvim druge karakteristike u smislu ponašanja turbulentnih tokova. Ovdje opet treba napomenuti da bi svaka statistička obrada podataka ovakvog tipa bila statistički značajnija za puno duži period mjerjenja i za nekoliko puta veći broj registriranih epizoda bure.

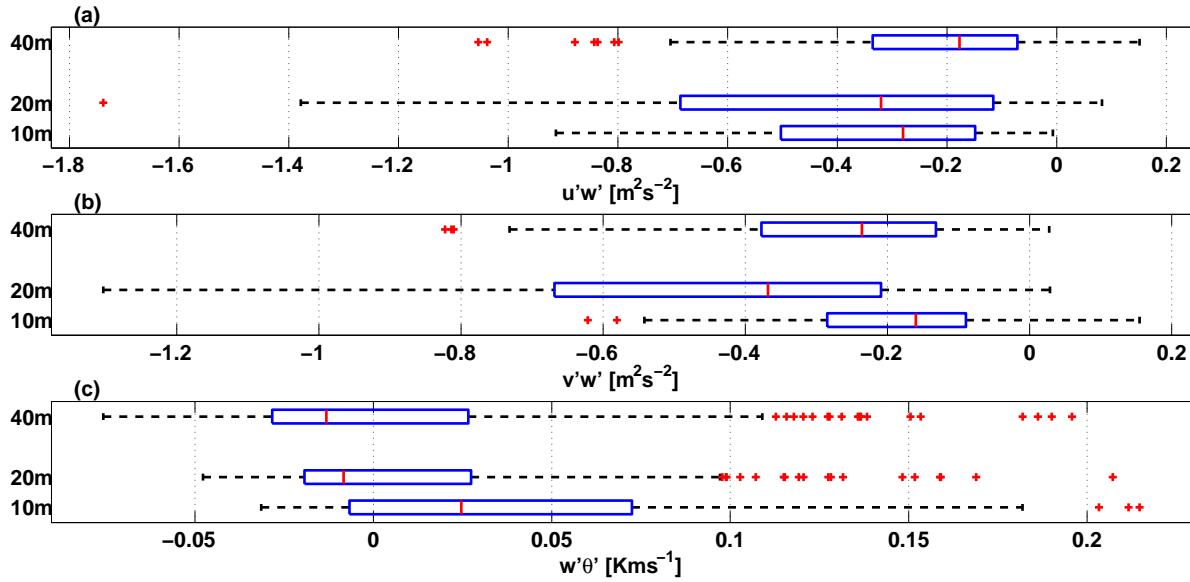
Na slikama 12 do 14 prikazani su tzv. *box-plot* dijagrami za definirane klase epizoda bure, koji služe kao jedan od mogućih prikaza vertikalnih turbulentnih tokova u ovisnosti o visini (izostavljena je vremenska komponenta). Uočava se izrazita promjenjivost turbulentnih tokova s visinom, posebice impulsa na 20 m visine u slučaju sve tri klase.



Slika 12: Box-plot prikazi vertikalnih turbulentnih tokova: (a) impulsa $\bar{u}'\bar{w}'$ na sve tri visine; (b) impulsa $\bar{v}'\bar{w}'$ na sve tri visine; (c) topline $\bar{w}'\theta'$ na sve tri visine, za klasu kratkih bura. Crvena linija predstavlja medijan, krajni lijevi i desni rub plavog prozora predstavljaju 25. odnosno 75. percentil, crtkane horizontalne linije se protežu do podataka koji se još ne smatraju *outlierima*, dok crveni plusići predstavljaju same *outliere* tj. vrijednosti više od 1.5 puta veće od pripadnog interkvartilnog raspona.



Slika 13: Box-plot prikazi vertikalnih turbulentnih tokova: (a) impulsa $\bar{u}'\bar{w}'$ na sve tri visine; (b) impulsa $\bar{v}'\bar{w}'$ na sve tri visine; (c) topline $\bar{w}'\theta'$ na sve tri visine, za klasu srednjih bura.



Slika 14: Box-plot prikazi vertikalnih turbulentnih tokova: (a) impulsa $\overline{u'w'}$ na sve tri visine; (b) impulsa $\overline{v'w'}$ na sve tri visine; (c) topline $\overline{w'\theta'}$ na sve tri visine, za klasu dugih bura (tj. buru #9).

U svrhu kvantificiranja promjenjivosti vertikalnih turbulentnih tokova s visinom, na međunivoima 15 i 30 m definirani su i uvaženi jedino oni koeficijenti (za pojedini turbulentni tok) koji pretpostavljaju promjenjivost tokova unutar 20 %, na sljedeći način:

$$K_{15} = \left| \frac{\{\overline{u'w'}, \overline{v'w'}, \overline{w'\theta'}\}_{20m} - \{\overline{u'w'}, \overline{v'w'}, \overline{w'\theta'}\}_{10m}}{\{\overline{u'w'}, \overline{v'w'}, \overline{w'\theta'}\}_{10m}} \right| \leq 0.2 \quad (4.1)$$

$$K_{30} = \left| \frac{\{\overline{u'w'}, \overline{v'w'}, \overline{w'\theta'}\}_{40m} - \{\overline{u'w'}, \overline{v'w'}, \overline{w'\theta'}\}_{20m}}{\{\overline{u'w'}, \overline{v'w'}, \overline{w'\theta'}\}_{20m}} \right| \leq 0.2 \quad (4.2)$$

Ukupan postotak 30-minutnih srednjaka (koji zadovoljavaju relacije (4.1) i (4.2)) za pojedinu klasu dan je u tablici 2.

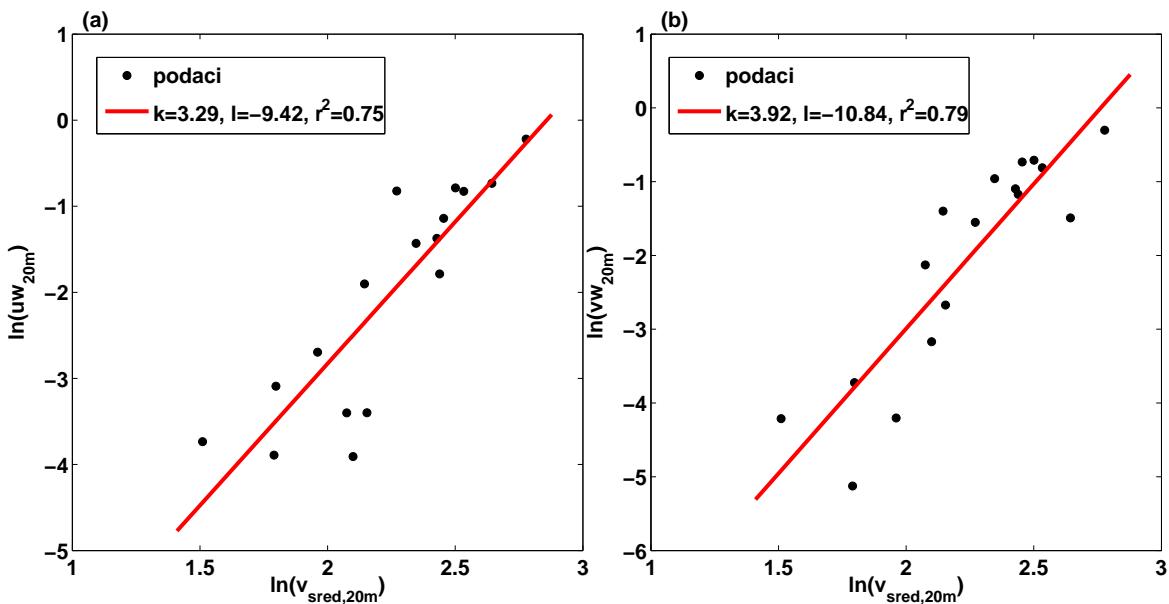
Tablica 2: Postotak 30-minutnih srednjaka pojedinog vertikalnog turbulentnog toka, promjenjivosti unutar 20 %, na međunivoima 15 i 30 m.

%	$\overline{u'w'}_{15m}$	$\overline{u'w'}_{30m}$	$\overline{v'w'}_{15m}$	$\overline{v'w'}_{30m}$	$\overline{w'\theta'}_{15m}$	$\overline{w'\theta'}_{30m}$
kratke	25	25	8	22	18	48
srednje	24	21	8	12	17	39
duge	20	24	2	20	12	36

Kao što je vidljivo u tablici 2, vertikalni turbulentni tokovi, pogotovo impulsa $\overline{v'w'}$, pokazuju vrlo slabu nepromjenjivost s visinom za vrijeme puhanja bure (valja izdvojiti neočekivano intenzivan tok impulsa na 20 m visine, slike 12 do 14). Vertikalni turbulentni tok topline $\overline{w'\theta'}$ pokazuje najslabiju promjenljivost s visinom. Za sve klase i turbulentne tokove, vidljivo je da je postotak "konstantnih" srednjaka nešto veći na međunivou 30 m (izuzev klase srednjih bura

za tok impulsa $\overline{u'w'}$). Budući da su kraće bure u pravilu slabije (tablica 1), vidi se da i klase prate ponašanje opisano tablicom 2, tj. da je postotak nepromjenjivih srednjaka najveći za klasu kratkih bura.

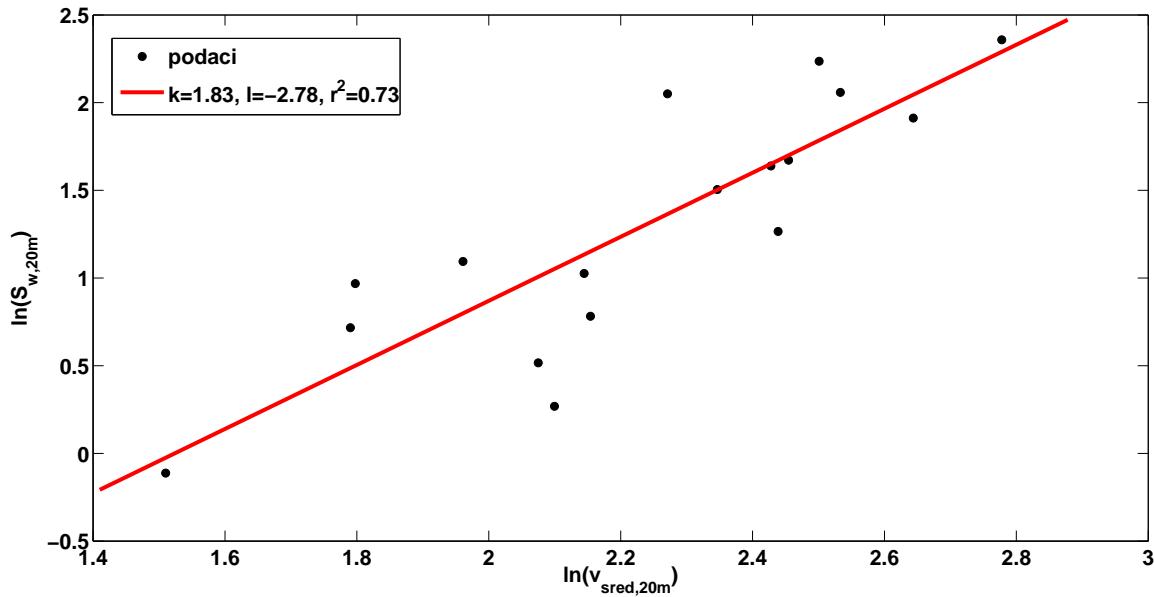
Pokazuje se da postoji jaka korelacija između srednje horizontalne brzine bure na 20 m i atipičnog iznosa vertikalnog turbulentnog toka impulsa na visini od 20 m (slika 15). Ta korelacija ukazuje na činjenicu da je mehaničko generiranje turbulencije (putem smicanja vjetra) intenzivnije što je bura jača. Vidljivo je da ovisnost nije linearna, no za dodatnu potvrdu bilo bi poželjno imati na raspolaganju mnogo veći broj epizoda bure.



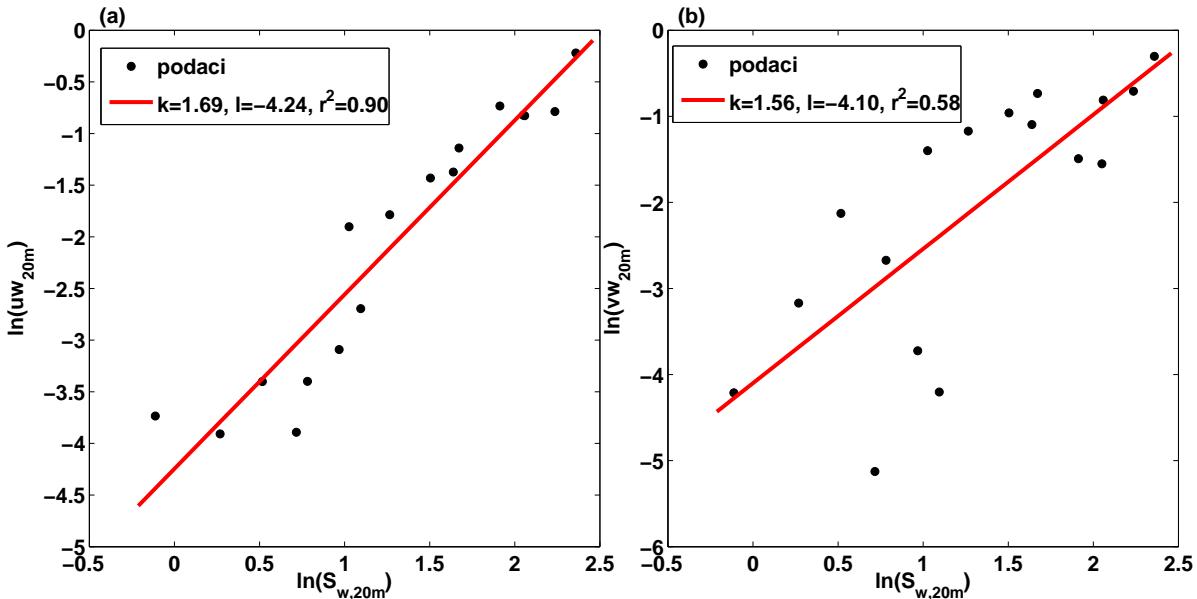
Slika 15: Ovisnost ukupnog osrednjjenog vertikalnog turbulentnog toka impulsa (a) $\overline{u'w'}$ i (b) $\overline{v'w'}$ na 20 m o srednjoj horizontalnoj brzini bure na 20 m visine za sve epizode bure. Crvena linija označava pravac linearne regresije $y = kx + l$, s parametrima obje regresije (koeficijent pravca k , odsječak na ordinati l , kvadrat koeficijenta korelacije r^2 kao ocjena uspješnosti prilagodbe) u legendi gore lijevo.

Atipično ponašanje toka impulsa na visini od 20 m, uočeno na slikama 12 do 14 se može objasniti pomoću slike 7c, budući da je površina ispod krivulja proporcionalna varijanci tj. energiji koju nosi vertikalna komponenta brzine w na pojedinoj visini (poglavlje 2.). Treba napomenuti da slika 7 predstavlja spektre koji su dobiveni kao srednjak spektra dotične komponente brzine vjetra svake pojedine epizode bure te je time neopravданo pretpostaviti da sve epizode bure, neovisno o svojoj srednjoj brzini i trajanju, pokazuju isto ponašanje. Štoviše, pokazuje se da je spomenuto ponašanje toka impulsa vrlo individualno za svaku buru.

Može se očekivati da će veći iznosi te površine (izračunate trapeznom formulom) biti karakteristični za takvo ponašanje toka impulsa na 20 m. U tu svrhu, nacrtani su odgovarajući dijagrami raspršenja (slike 16 i 17). Kako bi provjerili statističku signifikantnost koeficijenta korelacije r za navedene odnose (slike 15 do 17), jednostranim t-testom je potvrđeno da, na nivou signifikantnosti $\alpha = 0.05$, postoji signifikantna i relativno jaka povezanost.

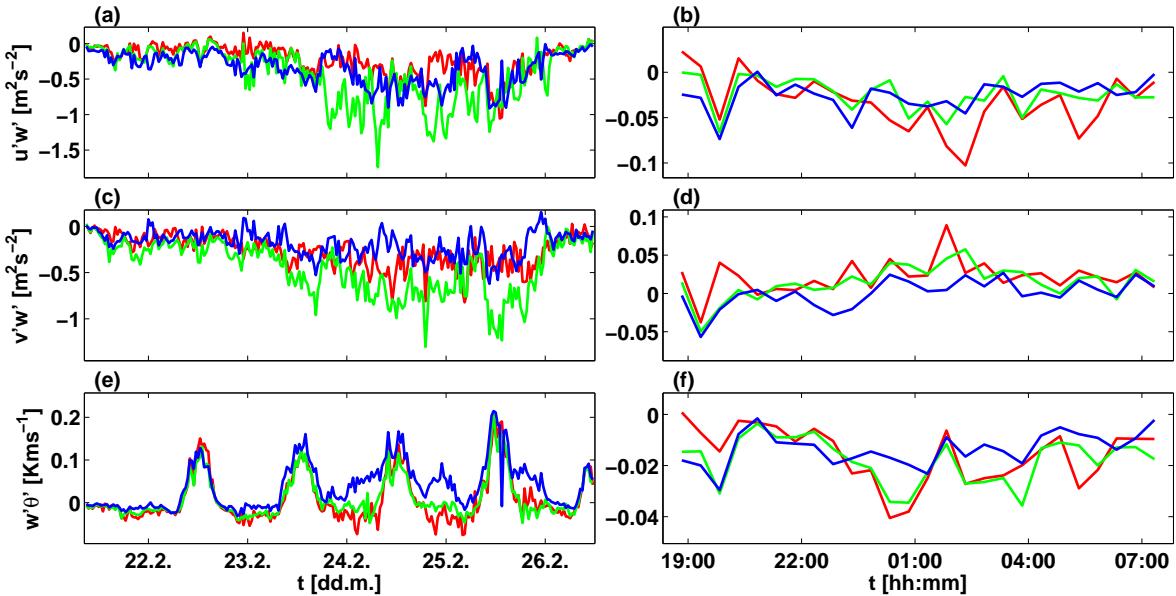


Slika 16: Ovisnost površine ispod krivulje spektra snage vertikalne komponente brzine S_w na 20 m o srednjoj horizontalnoj brzini bure na 20 m visine za sve epizode bure. Crvena linija označava pravac linearne regresije $y = kx + l$, s parametrima obje regresije u legendi gore lijevo.



Slika 17: Ovisnost ukupnog osrednjjenog vertikalnog turbulentnog toka impulsa (a) $\overline{u'w'}$ i (b) $\overline{v'w'}$ na 20 m o površini ispod krivulje spektra snage vertikalne komponente brzine S_w na 20 m visine. Crvena linija označava pravac linearne regresije $y = kx + l$, s parametrima obje regresije u legendi gore lijevo.

Daljnja analiza u ovom radu provedena je za dvije ekstremne epizode bure: najduljoj buri #9 i jednoj od najkraćih epizoda bure, buri #12 (vidi detalje u Dodatku A). Kako bi se promotrla i vremenska dinamika ponašanja turbulentnih tokova, 30-minutni srednjaci istih prikazani su na slici 18.



Slika 18: Prikaz vertikalnih turbulentnih tokova za dvije izdvojene epizode bure: (a), (c) i (e) prikazuju sva tri turbulentna toka za najdužu buru #9; (b), (d) i (f) prikazuju sva tri turbulentna toka za kratku buru #12. Dotični turbulentni tok na 10 m visine označen je plavom bojom, zelenom bojom na 20 m te crvenom bojom na 40 m visine.

Kao što je vidljivo na slikama 18a do 18d, vertikalni turbulentni tokovi impulsata $\overline{u'w'}$ i $\overline{v'w'}$ tijekom čitave epizode bure uglavnom imaju negativan predznak, što je posljedica logaritamskog profila vjetra (iznimka je tok impulsa $\overline{v'w'}$ za buru #12, slika 18d): zbog porasta brzine vjetra s visinom ($u', v' > 0$) dolazi do prevrtanja zraka nadolje ($w' < 0$). Također, valja izdvojiti i ranije opažene relativno velike vrijednosti turbulentnih tokova impulsata na visini od 20 m, što nije uobičajeno ponašanje za prizemni sloj: prema Stullu (1988), turbulentni tokovi u prizemnom sloju se u pravilu ne mijenjaju više od 10-20%. Zanimljivo je da do pojave ovog fenomena dolazi jedino pri većim brzinama puhanja bure (za usporedbu gledati slike 18a, c te sliku 33 u Dodatku A): za vrijeme olujnog perioda bure, tijekom 24. i 25. veljače, tokovi impulsata na 20 m su najintenzivniji. Nakon što bura počne slabjeti u noći s 25. na 26. veljače vidljivo je da tokovi impulsata pokazuju vrlo slabu promjenu s visinom. Ovakvo ponašanje izostaje kod bure #12.

S druge strane, iz vremenskih nizova vertikalnog turbulentnog toka topline (slike 18e, f) može se prepoznati dnevni hod stratifikacije tj. statičke stabilnosti na mjestu mjernog tornja: tijekom dana tokovi su na sve tri visine pozitivni, što je tipično za konvektivnu situaciju ($w' > 0, \theta' > 0$) i u prosjeku vedro vrijeme, što je i opravданo budući da se radi o anticiklonalnoj buri (slika 18e, Dodatak A). Tijekom noći, tokovi su približno jednaki nuli ili donekle negativni, što je odlika neutralnog ili blago stratificiranog sloja uz eventualnu blagu supersidenciju zraka u visini ($w' < 0, \theta' > 0$). Izuzetak je tok topline na 10 m visine, koji i tijekom noći ima pozitivan predznak.

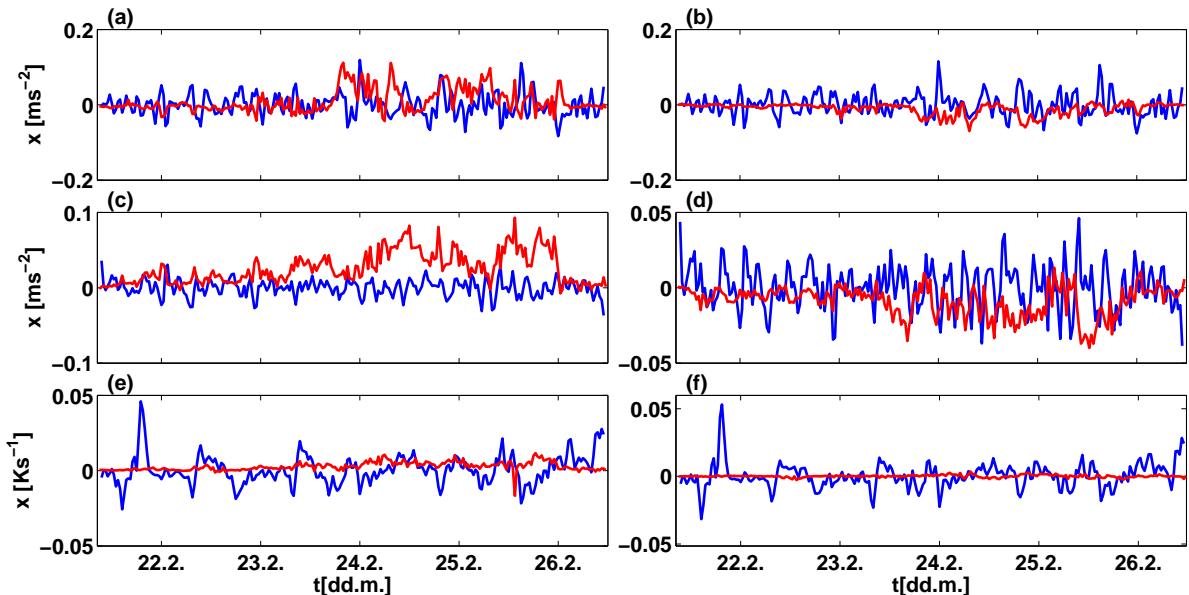
4.2.2 Divergencija turbulentnih tokova

Pored određivanja promjenjivosti vertikalnih turbulentnih tokova s visinom te zahvaljujući većem broju instrumenata na mjernom tornju, korisnim se pokazuje uvid u prirodu divergencije istih tokova po vertikali. U ovom je radu za aproksimaciju divergencije vertikalnih turbulentnih tokova korišten pojednostavljen sustav jednadžbi (2.14) - (2.16). Dodatni zaključak koji se može izvesti iz promatranja takvog sustava je njegova primjenjivost na dano strujanje (bura), odnosno je li takav sustav, uz primjenjene pretpostavke, zatvoren za slučaj bure na Pometenom brdu.

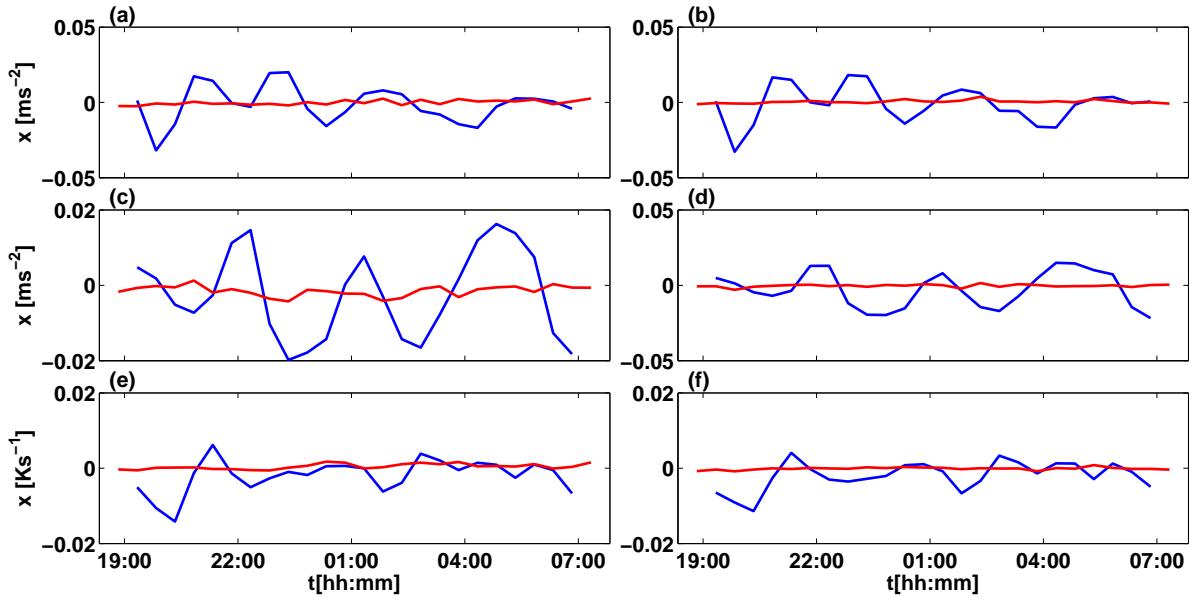
Budući da se radi o analitički nerješivim jednadžbama, za numeričku aproksimaciju lijeve i desne strane (2.14) - (2.16) korištena je metoda konačnih razlika, pri čemu je za lijevu stranu korištena centralna shema u vremenu, dok je za desnu stranu korištena jednokoračna shema u prostoru ((4.3) i (4.4), pri čemu je $x = u, v, \theta$). Sve zajedno je opet gledano na dva međunivoa, 15 i 30 m visine. Analiza je provedena za dvije dosad promatrane bure (#9 i #12, tablica 1), no slično ponašanje primjećeno je i u slučaju ostalih 15 epizoda bure. Rezultati su prikazani na slikama 19 i 20.

$$\frac{x_{15\text{m}}(j+1) - x_{15\text{m}}(j-1)}{60} = -\frac{\bar{xw}_{20\text{m}}(j) - \bar{xw}_{10\text{m}}(j)}{10}, \quad (4.3)$$

$$\frac{x_{30\text{m}}(j+1) - x_{30\text{m}}(j-1)}{60} = -\frac{\bar{xw}_{40\text{m}}(j) - \bar{xw}_{20\text{m}}(j)}{20}. \quad (4.4)$$



Slika 19: Vremenski niz članova jednadžbe (2.14) do (2.16) za najdulju buru #9: (a, c, e) se odnose na međunivo 15 m, (b, d, f) na međunivo 30 m. Plava krivulja označava lijevu stranu tih jednadžbi (lokalna promjena), crvena krivulja desnu stranu (derivaciju turbulentnog toka po visini).

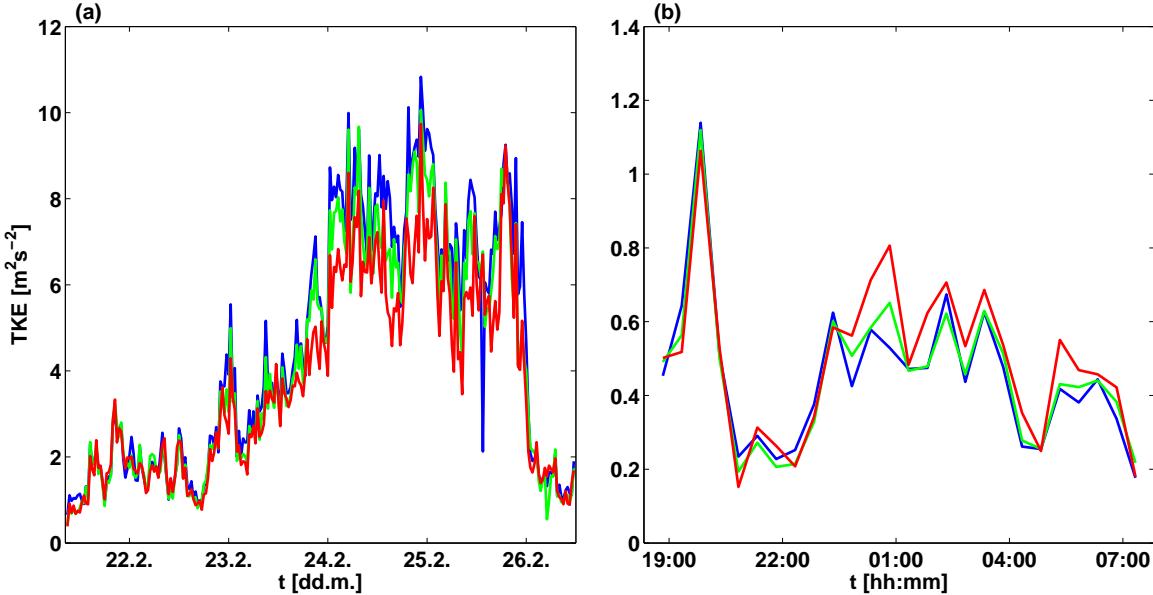


Slika 20: Vremenski niz članova jednadžbe (2.14) do (2.16) za kratku buru #12: (a, c, e) se odnose na međunivo 15 m, (b, d, f) na međunivo 30 m. Plava krivulja označava lijevu stranu tih jednadžbi (lokalna promjena), crvena krivulja desnu stranu (derivaciju turbulentnog toka po visini).

Slike 19 i 20 ukazuju na nejednakost lijeve i desne strane jednadžbi (2.14) - (2.16), odnosno na očitu neopravdanost zanemarivanja članova s horizontalnim derivacijama (što ima smisla, budući da je teren u okolini tornja, koji je na samom vrhu brda, vrlo kompleksan). Zanemareni članovi, smješteni pod zajedničkim rezidualnim varijablama R_x, R_y, R_θ , očito imaju dominantan doprinos. Drugim riječima, sustav pojednostavljenih jednadžbi (2.14) - (2.16) nije zatvoren za slučaj bure na Pometenom brdu.

4.3 Analiza jednadžbe ravnoteže TKE

Vremenski hod 30-minutnih srednjaka TKE izračunat je za bure #9 i #12 prema relaciji (2.18), te je prikazan na slici 21.



Slika 21: Prikaz TKE za (a) najdužu buru #9 i (b) kratku buru #12 na svim visinama: plava krivulja se odnosi na visinu 10 m, zelena krivulja na 20 m te crvena krivulja na visinu 40 m.

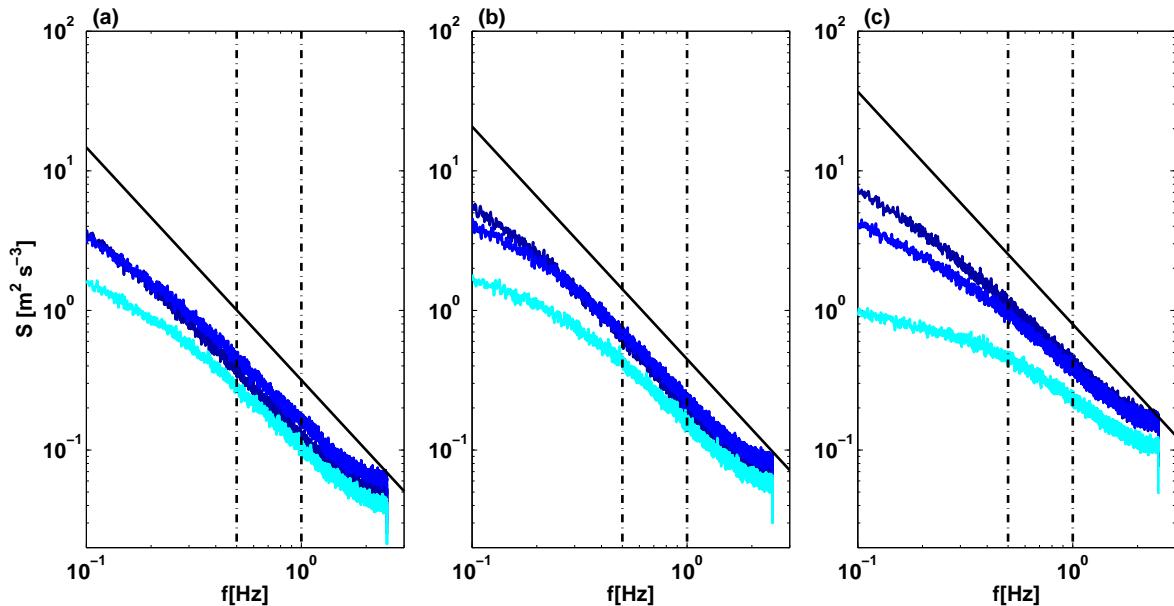
Promatrajući buru #9 na slici 21a uglavnom se uočava pad TKE s visinom što je u skladu s teorijom (turbulencija je najjača pri tlu, ne računajući pri tome sekundarni maksimum u području loma planinskih valova). Bura #12 ne pokazuje takvo ponašanje budući da njena TKE uglavnom raste s visinom, no treba imati na umu i red veličine TKE, budući da se radi o vrlo slaboj i "tranzijentnoj" epizodi bure.

4.3.1 Proračun viskozne disipacije

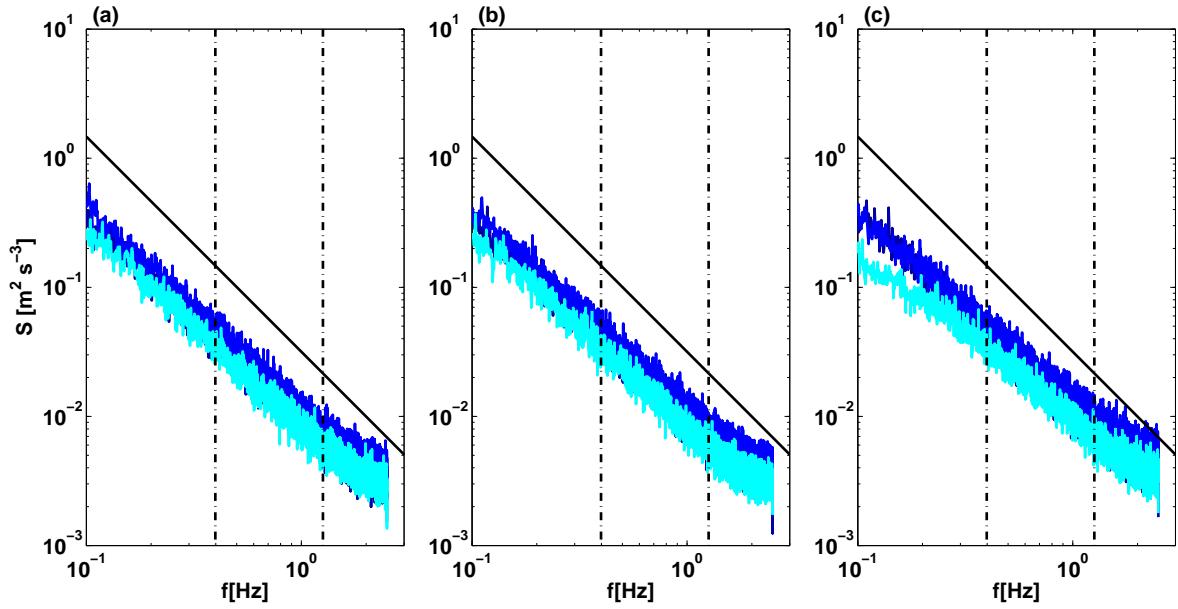
Pored analize turbulentnih tokova, u ovom radu oni su iskorišteni i za provjeru zatvaranja pojednostavljene jednadžbe ravnoteže TKE (poglavlje 2., jednadžba (2.20)) za slučaj bure na Pometenom brdu. Međutim, prije bilo kakvog proračuna članova te jednadžbe, potrebno je provjeriti da li su zadovoljeni kriteriji iz poglavlja 2.4, tj. pokušati uočiti inercijalno potpodručje za dotičnu epizodu bure. Ukoliko ono postoji, na temelju relacije (2.25) moguće je procjeniti viskoznu disipaciju na pojedinoj visini pomoću metode inercijalne disipacije (IDM). Kao i prije, ovdje su svi proračuni provedeni za bure #9 i #12.

Za provjeru prisutnosti inercijalnog potpodručja promatrani su nagibi spektara snage komponenti brzine vjetra te omjeri tih spektara (poglavlje 2.4). Za proračun ovdje korištenih spektara korišteni su prozori duljine $2^{13} = 8192$ podataka (≈ 27 min) s 50 % preklapanja. Prozor upravo

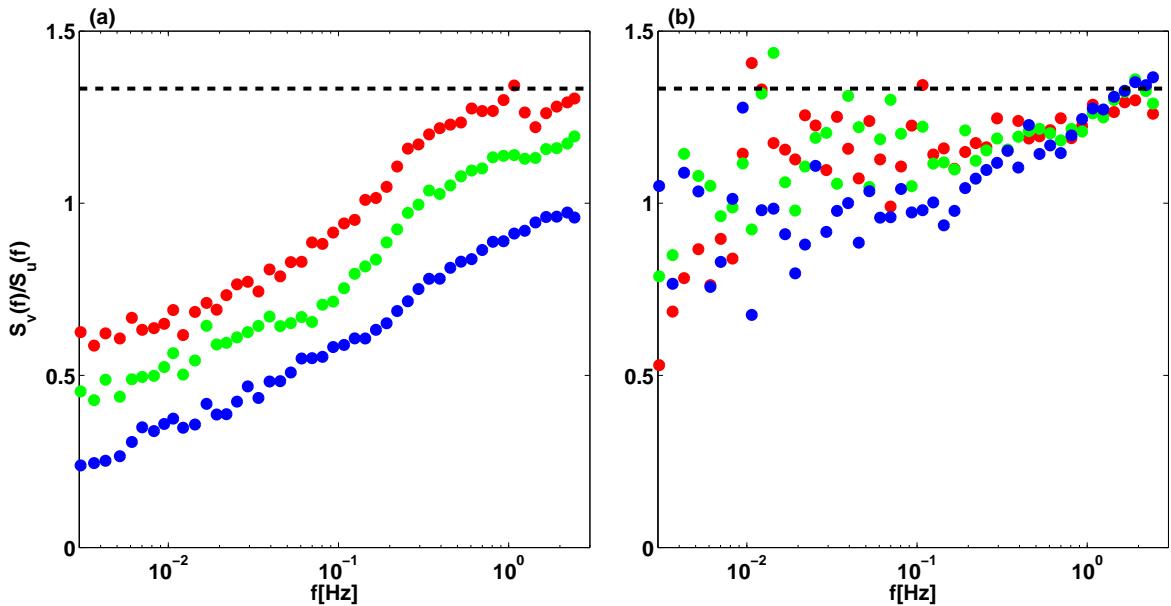
ove duljine je korišten u svrhu pravilnog proračuna 30-minutnih srednjaka viskozne disipacije. Ukoliko nagibi približno prate pravac koeficijenta smjera $-5/3$ i omjeri teže vrijednosti $4/3$ (zahtjev za lokalnu izotropnost turbulentcije), opravdano je pretpostaviti prisutnost inercijalnog potpodručja i provesti proračun viskozne disipacije. Rezultati ovih provjera prikazani su na slikama 22 do 25.



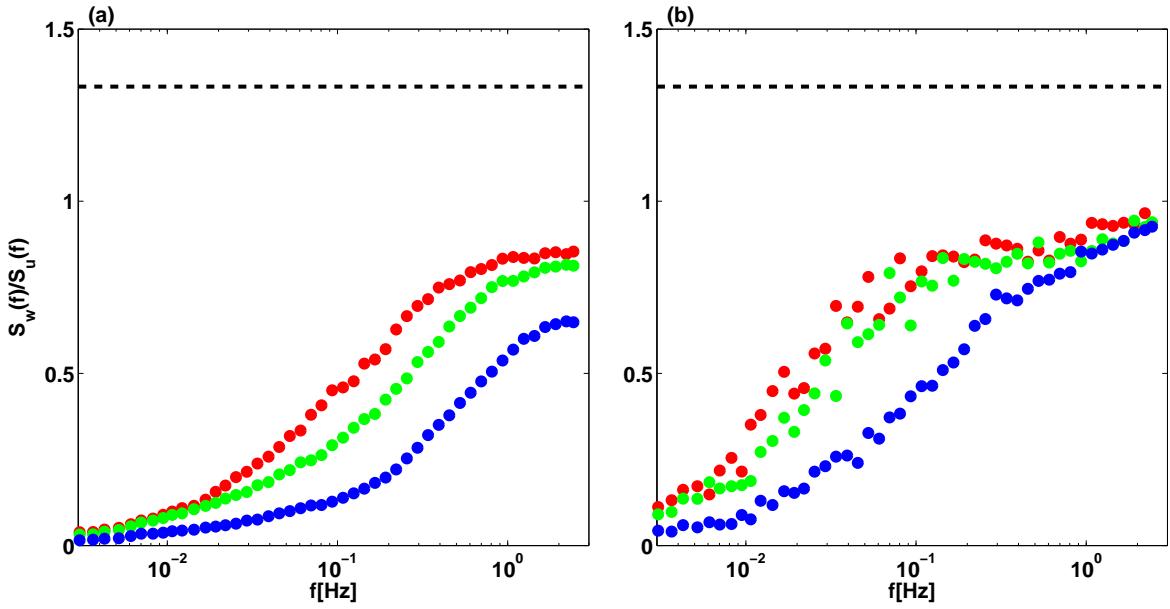
Slika 22: Log-log prikaz spektara snage komponenti brzine vjetra za najdulju buru #9 na : (a) 40 m, (b) 20 m te (c) 10 m visine. Tamno plava krivulja predstavlja spektar u komponente, plava krivulja v komponente te svijetlo plava w komponente brzine. Puna crna linija predstavlja pravac $y = -5/3 x$ u log-log obliku, dok dvije točka-crtica linije predstavljaju interval frekvencija $[0.5, 1]$ Hz unutar kojega je uvjet na nagib najbolje zadovoljen na svim visinama.



Slika 23: Log-log prikaz spektara snage komponenti brzine vjetra za kratku buru #12 na : (a) 40 m, (b) 20 m te (c) 10 m visine. Tamno plava krivulja predstavlja spektar u komponente, plava krivulja v komponente te svijetlo plava w komponente brzine. Puna crna linija predstavlja pravac $y = -5/3 x$ u log-log obliku, dok dvije točka-crta linije predstavljaju interval frekvencija $[0.40, 1.26]$ Hz unutar kojega je uvjet na nagib najbolje zadovoljen na svim visinama.



Slika 24: Log-lin prikaz omjera spektara snage lateralne i longitudinalne (S_v/S_u) komponente brzine vjetra za (a) najdulju buru #9 te (b) kratku buru #12. Omjeri na 40 m visine su označeni crvenom bojom, omjeri na 20 m zelenom bojom te omjeri na 10 m plavom bojom. Crna crtka na linija predstavlja pravac $y = 4/3$.



Slika 25: Log-lin prikaz omjera spektara snage vertikalne i longitudinalne (S_w/S_u) komponente brzine vjetra za (a) najdulju buru #9 te (b) kratku buru #12. Omjeri na 40 m visine su označeni crvenom bojom, omjeri na 20 m zelenom bojom te omjeri na 10 m plavom bojom. Crna crtakana linija predstavlja pravac $y = 4/3$.

Kao što je vidljivo na slikama 22 i 23, spektri približno prate pravac nagiba $-5/3$ unutar izdvojenog intervala, s tim da spektri S_u i S_v zadržavaju takav nagib i pri nižim frekvencijama od ovdje odabranih intervala. Ovo je u suglasnosti s ostalim radovima koji se bave proračunom viskozne disipacije pomoću metode inercijalne disipacije (npr. Champagne, 1978; Večenaj i sur., 2011; Večenaj i sur., 2012; Večenaj, 2012). Sa smanjenjem visine, vidljiv je početak odstupanja od tog pravca na sve višim frekvencijama za sve spekture, posebice za spektar vertikalne komponente brzine S_w .

Iz prikaza omjera spektara S_v/S_u (slika 24) vidljivo je da ti omjeri (u slučaju obje bure), idući ka sve višim frekvencijama (do Nyquistove frekvencije, 2.5 Hz), teže vrijednosti $4/3$, doduše na donekle različit način. U slučaju bure #9, omjeri na 10 i 20 m visine ne dostižu tu vrijednost (oni teže k 1, odnosno ≈ 1.2), dok kod bure #12 sva tri omjera dostižu vrijednost $4/3$, iako pri nižim frekvencijama pokazuju nepravilno ponašanje. Bura #9 pak pokazuje relativno ravnomjerno, postupno konvergiranje.

Konačno, promatrani su i omjeri vertikalne i longitudinalne komponente brzine S_w/S_u (slika 25): u slučaju bure #9 taj omjer na nijednoj visini ne teži turbulentnoj izotropiji (postiže se samo < 1), no konvergiranje je još pravilnije nego u slučaju omjera S_v/S_u . Vrijednosti omjera $S_w/S_u < 1$ idu u prilog ranijoj konstataciji (poglavlje 3.1) da je strujanje *horizontalno polarizirano*, s tim da se ovdje uočava da je takvo ponašanje sve izraženije sa smanjenjem visine za buru #9 (njamanji iznosi omjera za najdulju buru). Za razliku od prikaza na slici 24b, bure #12 sada ne pokazuje konvergiranje ka $4/3$, no vidi se da sva tri omjera, za razliku od bure #9, teže k istoj vrijednosti (≈ 1).

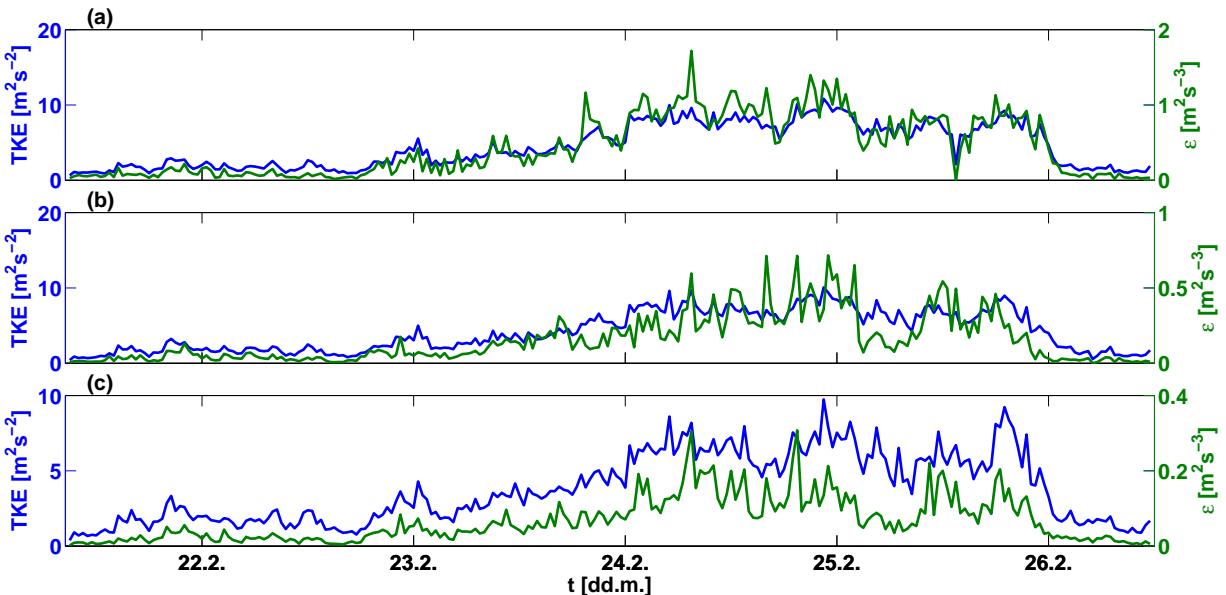
Unatoč relativno neočekivanom i uvjetno nepoželjnom ponašanju omjera S_w/S_u kod obje bure, za obje je pretpostavljena prisutnost inercijalnog potpodručja unutar spomenutih intervala frekvencija, ponajviše zahvaljujući relativno dobrom praćenju nagiba pravca koeficijenta smjera $-5/3$ (slike 22 i 23).

Kao konačni preduvjet za proračun viskozne disipacije, potrebno je provjeriti da li je zadovoljena Taylorova hipoteza o "zamrznutoj" turbulencijskoj strukturi. Pripadni omjeri standardnih devijacija i srednjaka u komponente brzine dani su u tablici 3. Vidi se da je uvjet (2.24) zadovoljen za obje bure na svim visinama (uočava se smanjenje omjera s porastom visine).

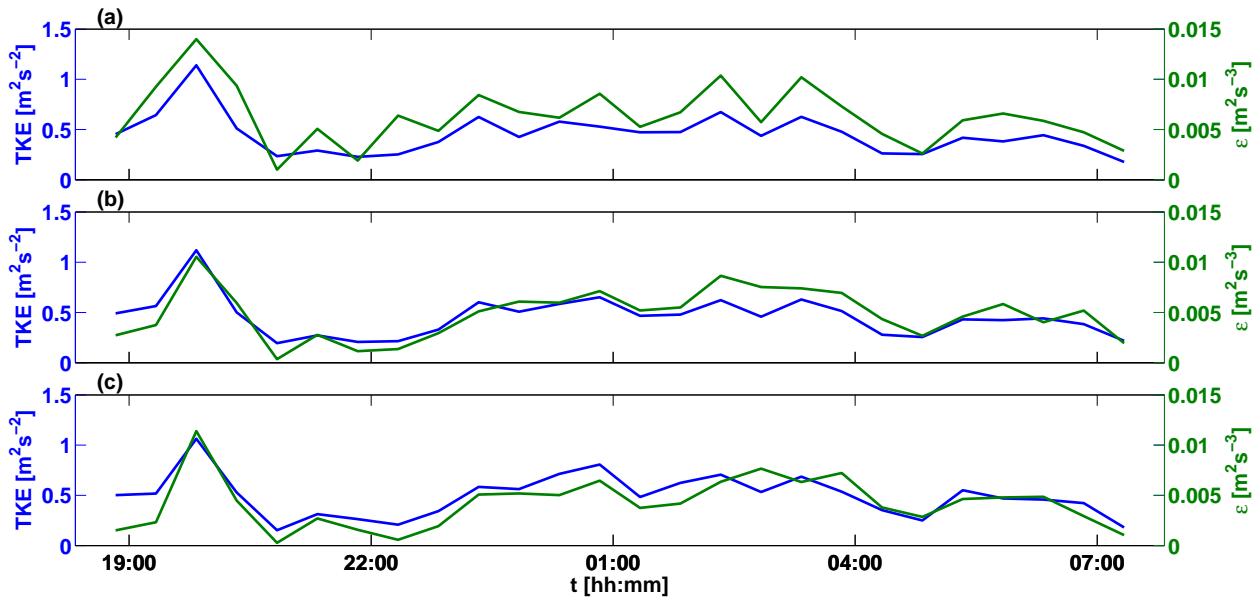
Tablica 3: Omjeri standardnih devijacija i srednjaka longitudinalne (u) komponente brzine prema (2.24) za bure #9 i #12 na svim visinama.

	10 m	20 m	40 m
bura #9	0.36	0.35	0.34
bura #12	0.15	0.14	0.12

Na slikama 26 i 27 prikazani su međusobni odnosi TKE i viskozne disipacije ϵ u vremenu. Izrazito visoka koreliranost ukazuje na dobro proveden proračun ϵ putem IDM. To je u skladu s teorijom, budući da turbulencija nastoji sama sebe uništiti.



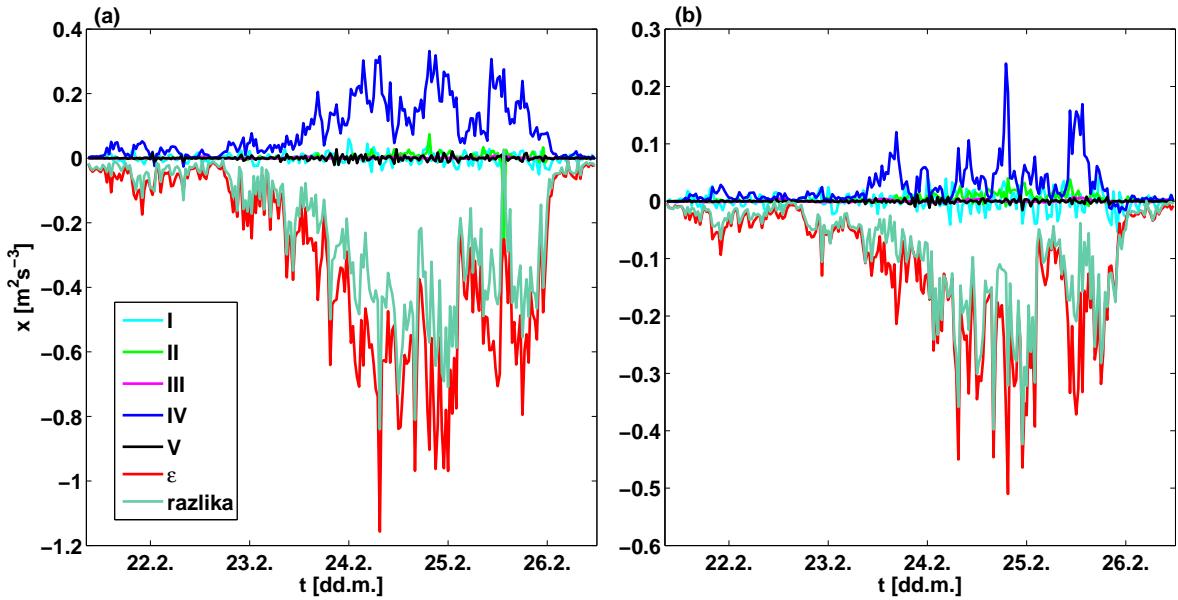
Slika 26: Vremenski niz TKE i viskozne disipacije ϵ na (a) 10 m, (b) 20 m te (c) 40 m visine za najdulju buru #9. Plava krivulja označava TKE, zelena krivulja ϵ . Koeficijenti korelacije iznose: (a) $r = 0.95$, (b) $r = 0.83$ te (c) $r = 0.86$.



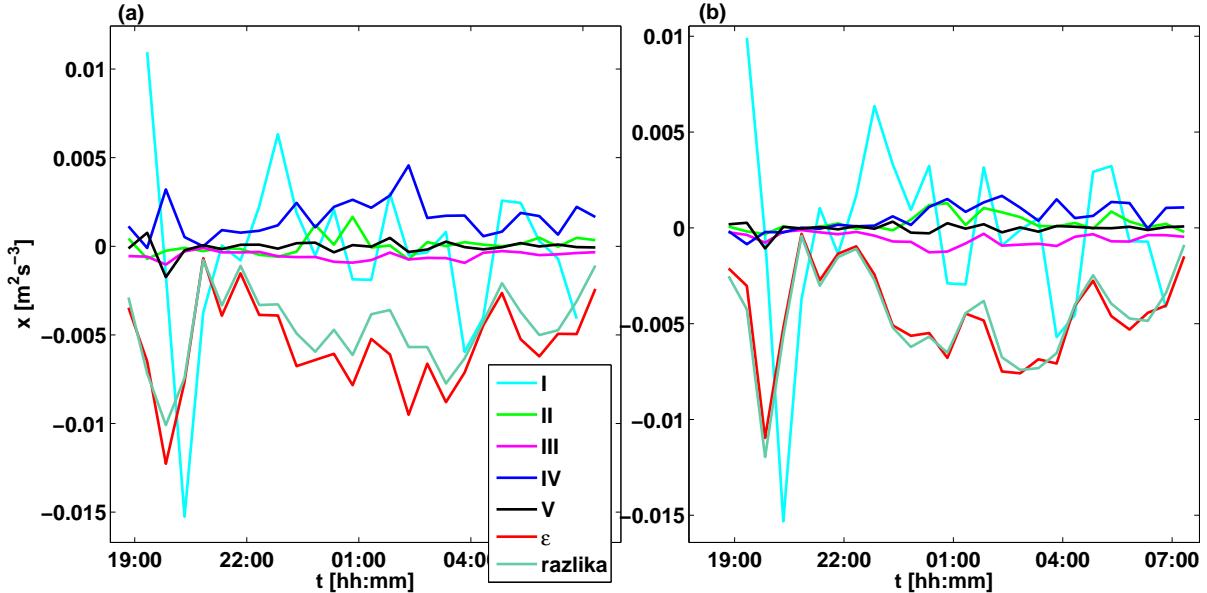
Slika 27: Vremenski niz TKE i viskozne disipacije ϵ na (a) 10 m, (b) 20 m te (c) 40 m visine za kratku buru #12. Plava krivulja označava TKE, zelena krivulja ϵ . Koeficijenti korelacija iznose: (a) $r = 0.89$, (b) $r = 0.85$ te (c) $r = 0.86$.

4.3.2 Zatvaranje jednadžbe ravnoteže TKE

Provjera svih navedenih kriterija bila je nužna za proračun viskozne disipacije ϵ putem metode inercijalne disipacije (IDM), što je i učinjeno za obje promatrane epizode bure. Konačno, može se pristupiti obradi i analizi (2.20). Na slikama 28 i 29 prikazani su pripadni vremenski nizovi članova jednadžbe ravnoteže TKE.



Slika 28: Vremenski niz članova u (2.20) za najdulju buru #9 na međunivoima (a) 15 m te (b) 30 m. Boje koje označavaju pojedine članove prikazane su u legendi, dok su sami članovi x analogni onima u poglavlju 2.3. Viskozna disipacija ϵ i član razlike su u svrhu preglednosti pomnoženi s -1.



Slika 29: Vremenski niz članova u (2.20) za kratku buru #12 na međunivoima (a) 15 m te (b) 30 m. Boje koje označavaju pojedine članove prikazane su u legendi, dok su sami članovi x analogni onima u poglavlju 2.3. Viskozna disipacija ϵ i član razlike su u svrhu preglednosti pomnoženi s -1.

Uzevši u obzir da je buru #9 jedna od najjačih evidentiranih epizoda bure (tablica 1, Dodatak A), slika 28 dodatno potvrđuje tu činjenicu budući je mehanička produkcija (smicanje) najjače za vrijeme olujnog perioda ove epizode bure te viskozna disipacija dostiže svoju maksimalnu vrijednost tijekom istog perioda. Na oba međunivoa je vidljivo da ta dva člana u (2.20) predstavljaju glavni doprinos lokalnoj produkciji i destrukciji turbulencije (svi ostali doprinosi su

relativno malog iznosa, praktički zanemarivi). S povećanjem visine, očit je pad vrijednosti ta dva člana, unatoč povećanju brzine s visinom. U slučaju bure #12 (Dodatak A), na slici 29 je vidljivo da su članovi mehaničke produkcije i viskozne disipacije sada usporedivi s ostalim članovima, posebice lokalnom promjenom TKE.

Zatvaranje jednadžbe ravnoteže TKE (2.20) je u ovom radu proučavano u smislu odnosa produkcije i destrukcije TKE na lokaciji mjernog tornja. Produciju uvijek čini član mehaničke produkcije (IV) te uzgonski član (III), ukoliko je vertikalni turbulentni tok topline $\overline{w'\theta'} > 0$; pod destrukciju spadaju viskozna disipacija ϵ i uzgonski član (III), ukoliko je vertikalni turbulentni tok topline $\overline{w'\theta'} < 0$. Dakle, pod njih se ne ubrajaju članovi advekcije TKE i transporta (bilo turbulentnog, bilo preraspodjele tlakom). Vremenski hod produkcije i destrukcije te njihova razlika (rezidual) prikazani su na slikama 28 i 29. Očito je da razlika produkcije i destrukcije nije zanemariva, što dovodi do zaključka da pojednostavljena jednadžba ravnoteže TKE (2.20) nije primjenjiva za slučaj zimske bure na Pometenom brdu. Kako bi se ta razlika svela (barem približno) na malu vrijednost, potrebno je uvažiti "međuigru" zanemarenih članova koji su sadržani unutar rezidualnog člana R . Horizontalna heterogenost i/ili član redistribucije tlakom očito igraju važnu ulogu u jednadžbi ravnoteže TKE te njihovo zanemarivanje nije opravdano.

Budući da se radi o kompleksnom terenu (npr. slika 2: navjetrinska, sjeveristočna strana Pometenog brda je nešto kompleksnija i strmija u odnosu na zavjetrinsku, jugozapadnu stranu), horizontalna homogenost nije primjenjiva aproksimacija, što je u skladu s divergencijom turbulentnih tokova gdje se također pokazalo da sustav (2.14) - (2.16) nije zatvoren.

4.4 Parametrizacijski odnos TKE i ϵ

Konačno, proračun TKE i viskozne disipacije omogućuje određivanje empirijske integralne skale turbulentne duljine Λ (poglavlje 2.5). U tu svrhu korištena je eksponencijalna forma ovisnosti TKE i ϵ , formulirana na sljedeći način:

$$y = ax^b \quad (4.5)$$

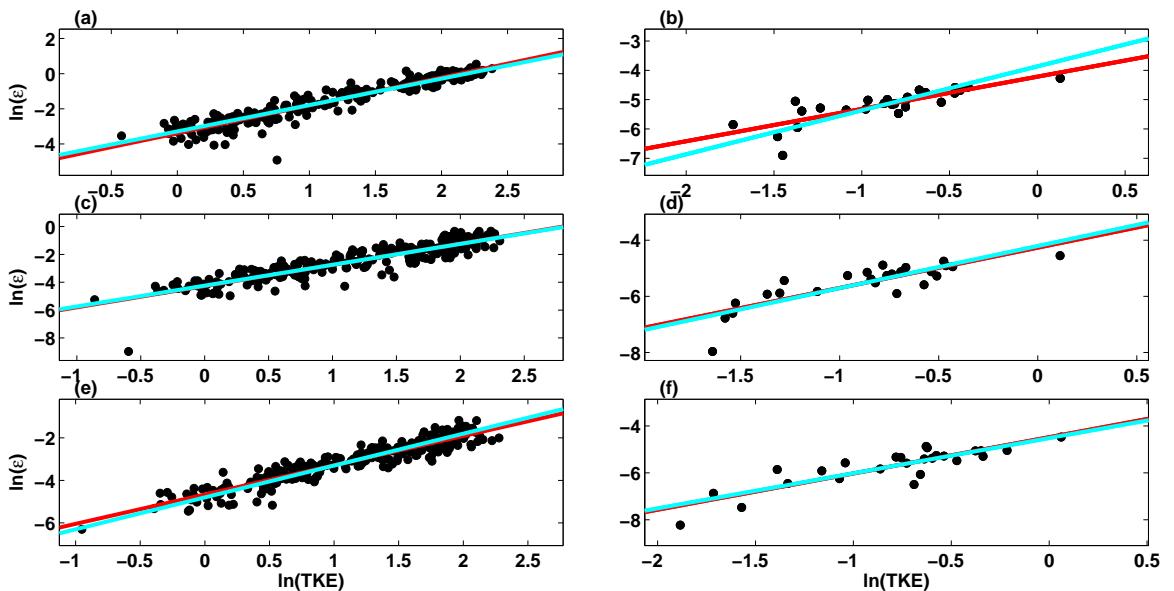
Usporedbom (2.26) i (4.5) slijedi da je $y = \epsilon$, $x = \text{TKE}$, $a = 1/\Lambda$ i $b = 1.5$. Nad 30-minutnim srednjacima TKE i ϵ proveden je postupak linearne regresije za obje epizode bure, te su dani pravci regresije prilagođeni ("fitani") na dotičnim dijagramima raspršenja za pojedinu visinu. Također, provedena je i linearna regresija uz *a priori* predefiniran eksponent $b_{\text{teor}} = 1.5$. Rezultati tako provedenih linearnih regresija prikazani su na dijagramima raspršenja (slika 30), dok su parametri istih regresija dani u tablici 4. Empirijska skala duljine je dobivena na temelju odsječka na ordinati za "teorijsku" regresiju (ne bi imalo smisla gledati regresiju nad samim podacima budući da dimenzionalna analiza nije zadovoljena: $[a] \neq m^{-1}$ zbog $k \neq b_{\text{teor}}$) putem

metode najmanjih kvadrata kao (vidi Dodatak B):

$$\Lambda = [\exp(\ln \epsilon - 1.5 \ln e)]^{-1} \quad (4.6)$$

Tablica 4: Parametri linearne regresije (koeficijenti smjera k , odsječci na ordinati l te kvadrati koeficijenta korelacije r^2) za obje bure na sve tri visine, za ovisnost viskozne disipacije ϵ o TKE.

	bura #9			bura #12		
	40 m	20 m	10 m	40 m	20 m	10 m
k	1.38	1.53	1.58	1.54	1.44	1.10
l	-4.67	-4.28	-3.39	-4.48	-4.27	-4.22
r^2	0.89	0.82	0.91	0.75	0.70	0.66
k_{teor}	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
l_{teor}	-4.80	-4.25	-3.29	-4.52	-4.21	-3.86
r^2_{teor}	0.88	0.82	0.91	0.75	0.70	0.58
Λ [m]	122 ± 7	70 ± 5	27 ± 2	91 ± 12	67 ± 10	48 ± 7



Slika 30: Dijagrami raspršenja viskozne disipacije u ovisnosti o TKE, za (a, c, e) najdulju buru #9 te (b, d, f) kratku buru #12. Gornji red predstavlja dijagram raspršenja na 10 m, srednji red na 20 m te donji red na 40 m visine. Crvena krivulja predstavlja prilagodbu (fit) nad samim podacima, dok plava krivulja predstavlja fit uz unaprijed određen teorijski koeficijent smjera 1.5.

Vidljiv je porast empirijske skale duljine s visinom za obje bure (tablica 4), međutim vrijednosti na 10 m i 40 m se puno više razlikuju kod bure #12. Porast veličine vrtloga s visinom je tipična karakteristika prizemnog sloja. Sličnu promjenu s visinom je primijetio i npr. Večenaj (2012), za ljetnu buru na Pometenom brdu. Ovdje je opet za sve promatrane odnose ispitana teza o statističkoj signifikantnosti koeficijenta korelacije r jednostranim t-testom na nivou signifikant-

nosti $\alpha = 0.05$. Pokazano je da je veza između svih promatranih odnosa statistički signifikantna i jaka.

5 Zaključak

Široka rasprostranjenost bure duž cijele istočne obale Jadrana te njena integriranost u svakodnevni život ljudi predstavlja velik izazov za njeno istraživanje, koji (izuzev zadnjih desetak godina) nije bio dovoljno potaknut. Glavni problematični faktori koji otežavaju proučavanje bure su, između ostalog, vrlo kompleksan i ponegdje nedostupan teren, izrazita mahovitost bure te olujne pa čak i orkanske brzine. S druge strane, finansijska sredstva potrebna za održavanje i korištenje instrumenata za proučavanje turbulencije na terenu također predstavljaju poteškoću.

Nedavna intenzivna istraživanja bure na sjevernom Jadranu, posebice njenih turbulentnih karakteristika, dovela su do nekih vrlo zanimljivih opažanja i zaključaka, koja uključuju klimatologiju bure duž obale, njene pulsacije te određene parametre turbulencije, poput turbulentne kinetičke energije (TKE). Ipak, pokazala se velika potreba za lokalnim mjerjenjima sa što većom vertikalnom rezolucijom, kako bi se mogao proučavati karakter turbulencije bure i po vertikali, kao i potencijal za proizvodnju električne energije. Ovo je konačno i započeto s mjernim tornjem na Pomenenom brdu, s tri ultrasonična anemometra raspoređenim na visinama 10 m, 20 m i 40 m, koji omogućuju visokofrekventna mjerjenja brzine vjetra i temperature, ključna za proračun određenih parametara turbulencije.

U ovom diplomskom radu korišteni su podaci s Pomenenog brda (pored Dugopolja, zaleđe Splita) za razdoblje od 1. siječnja do 31. ožujka 2011. godine. Nakon izvršene kontrole kvalitete podataka primjenjeni su kriteriji o smjeru i trajanju bure. Izdvojeno je ukupno 17 epizoda zimske bure tijekom promatranog tromjesečnog razdoblja (tablica 1), od vrlo kratkih ali intenzivnih, do višednevnih i olujnih epizoda bure. Za istraživanje turbulencije potrebno je poznavati vremensku skalu osrednjavanja turbulentnih gibanja, koja razdvaja procese na makroskali od onih, ovdje bitnih, procesa na mikroskali. Ovdje je, na temelju lokalnog minimuma u spektrima snage komponenti brzine i ogiva turbulentnih tokova, određena vremenska skala osrednjavanja u iznosu od 15 min.

Glavni cilj ovog rada bio je analizirati 30-minutne srednjake vertikalnih turbulentnih tokova impulsa i topline u kinematičkom obliku, proučiti njihovo ponašanje s visinom te ispitati njihovu konstantnost s visinom. Pokazalo se da turbulentni tokovi pokazuju izrazitu promjenjivost s visinom, pogotovo za jače bure. Kraće bure, koje su ujedno i nešto slabije (postoje iznimke, npr. frontalne bure), ne pokazuju "eksploziju" turbulentnog toka na visini od 20 m, dok turbulentni tokovi topline ne variraju u tolikoj mjeri s visinom (tablica 2).

U svrhu ispitivanja primjenjivosti određenih pojednostavljenih jednadžbi ali uobičajenih za proučavanje turbulentnih karakteristika za buru u zaleđu srednjeg Jadrana, minimalan ali dovoljan broj instrumenata na tornju (3) je omogućio proračun divergencije turbulentnih tokova na dva međunivoa. Pokazalo se da određene aproksimacije, od kojih je najvažnija, ali i najpopularnija, horizontalna homogenost, nisu opravdane za slučaj bure na srednjem Jadranu: kompleksan teren očito ima bitan, nezanemariv utjecaj na turbulentne tokove. Slično se po-

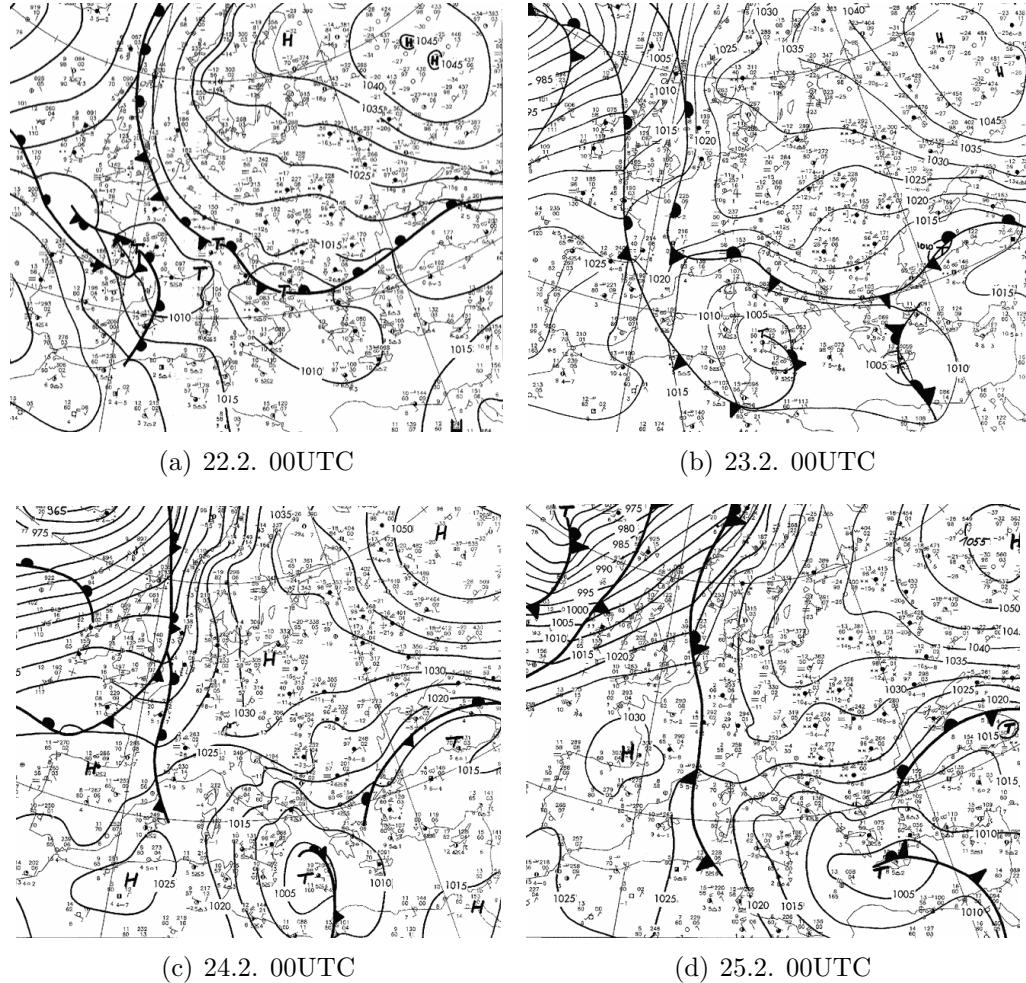
kazalo i za jednadžbu ravnoteže TKE , (2.20), gdje je također postalo očito da zanemarenje velikog broja članova (advekcija, transport, itd.) i promatranja samo vertikalne komponente cjelokupne dinamike, nije opravdano.

Proračun TKE i viskozne disipacije ϵ metodom inercijalne disipacije je omogućio i uvid u njihov parametrizacijski odnos koji nalazi svoju upotrebu u numeričkim modelima i parametrizaciji turbulentnih tokova. U tu svrhu određena je empirijska skala karakteristične duljine turbulentnih vrtloga Λ , za koju se pokazalo da raste s visinom (isto je opaženo i za ljetnu buru na ovoj lokaciji). Iz tog razloga nije opravdano koristiti jedinstvenu empirijsku skalu duljine turbulentnih vrtloga u numeričkim modelima.

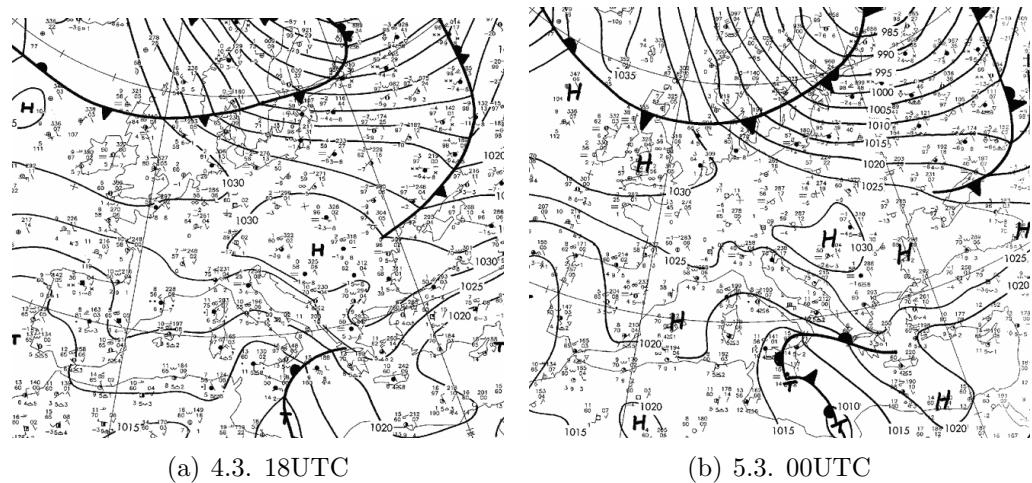
Iako je postavljanje mjernog tornja s nekoliko ultrasoničnih anemometara omogućilo uvid u vertikalnu strukturu turbulencije bure, dobiveni rezultati potvrđuju da bi za potpuniji opis turbulencije bure (npr. jednadžba (2.20)) bilo optimalno postaviti veći broj ovakvih tornjeva preko cijele površine Pomenenog brda. To bi dovelo, između ostalog, do proučavanja horizontalne divergencije turbulentnih tokova, odnosno uvida u njihovu horizontalnu strukturu. Nažalost, ovdje poteškoće opet predstavljaju kompleksan teren i (u još većoj mjeri) finansijska komponenta. Budući da je ovo prvi rad u kojem su podaci s Pomenenog brda iskorišteni za proračune vezane uz vertikalnu strukturu turbulencije, bilo bi preporučljivo isto provesti i za druge lokacije usko vezane uz buru (poput prijevoja ili zavjetrinskog podnožja višeg gorja), npr. sjeverni Jadran (Vratnik, Senj), južni Jadran (Dubrovnik), kroz eventualno puno duže trajanje mjerjenja, kako bi veći broj registriranih epizoda omogućio pravilniji i potpuniji statistički opis turbulencije bure.

6 Dodatak A

U ovom radu svi individualni proračuni rađeni su na dvjema burama: buri #9 te #12 (tablica 1). Odgovarajuće sinoptičke situacije za njihov period puhanja prikazane su na slikama 31 i 32.



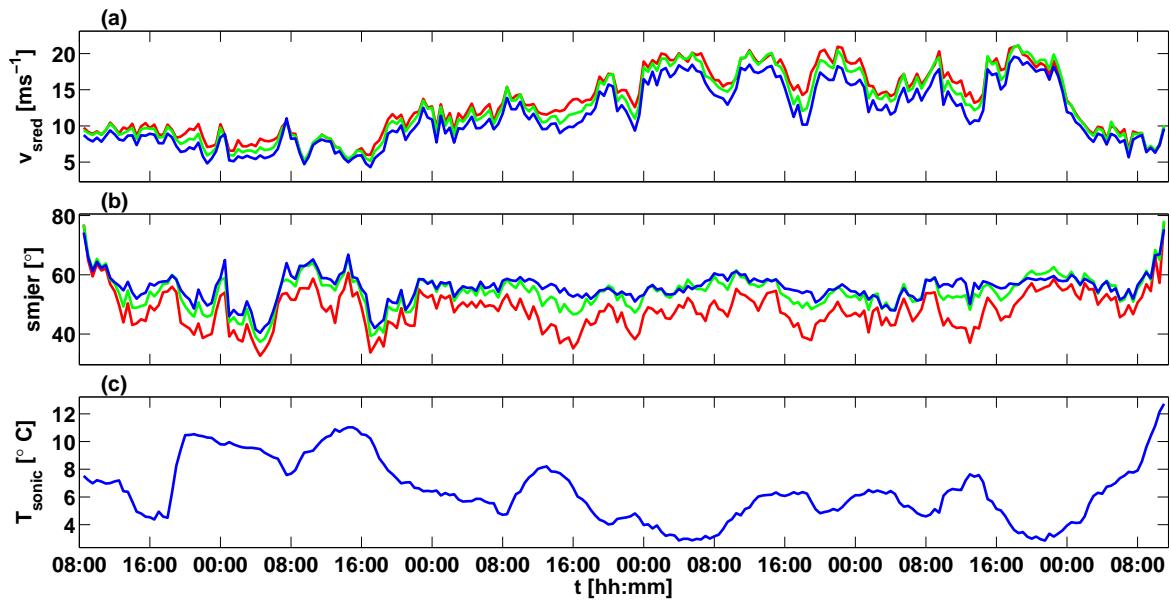
Slika 31: Sinoptička situacija nad Europom od 22. do 25. veljače 2011. godine, bura #9 (izvor: Deutscher WetterDienst).



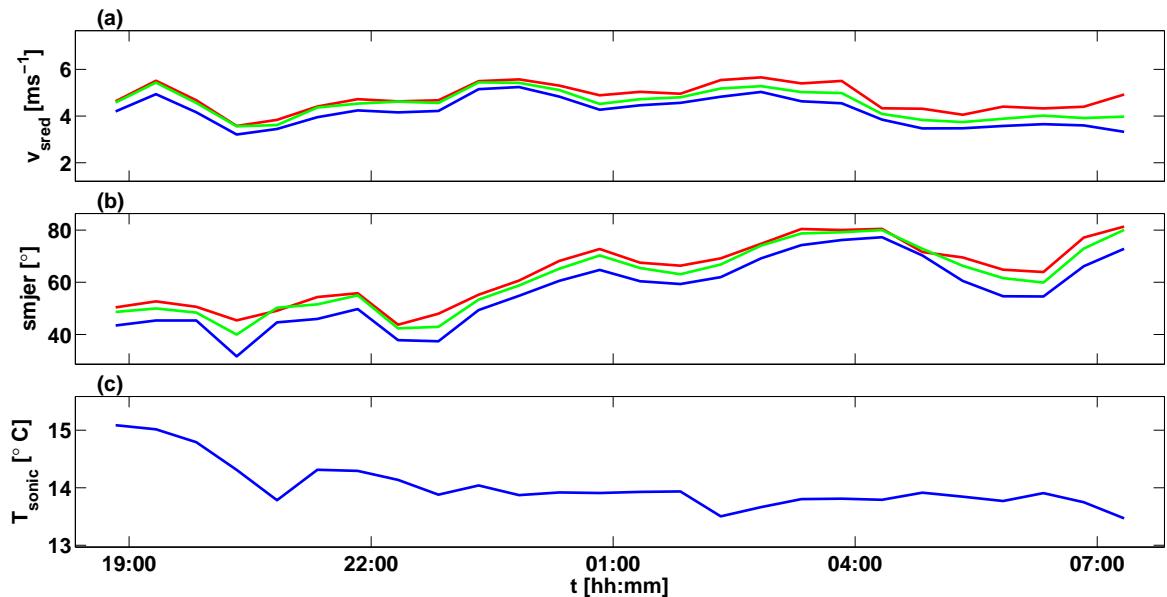
Slika 32: Sinoptička situacija nad Europom tijekom 4. i 5. ožujka 2011. godine, bura #12 (izvor: Deutscher WetterDienst).

U slučaju najdulje bure #9, vidljivo je široko zonalno polje povišenog tlaka zraka (Sibirska anticiklona) nad cijelom Europom, čije je sporo premještanje osiguralo dugotrajnost ove epizode bure. Kod kratke bure #12 vidi se premještanje centra niskog tlaka preko juga Apeninskog poluotoka i centar povišenog tlaka zraka nad Panonskom nizinom. Obzirom na prikazane sinoptičke situacije, očito je da je bura #9 primjer antiklunalne bure, dok bura #12 predstavlja "tranzijentnu" ciklonalnu buru u određenoj završnoj fazi (sudeći prema vrlo slabim srednjim brzinama, tablica 1).

Za vizualni dojam i kontrolu, slike 33 i 34 prikazuju odabrane bure #9 i #12: vidljiv je utjecaj podloge te porast brzine vjetra s visinom, kao i zakretanje vjetra s visinom (doduše u obrnutom smjeru za obje bure).



Slika 33: Prikaz 30-minutnih srednjaka: (a) horizontalne brzine, (b) smjera vjetra i (c) sonične temperature za buru #9. Crvena, zelena i plava krivulja se odnose na visine 40, 20 i 10 m.



Slika 34: Prikaz 30-minutnih srednjaka: (a) horizontalne brzine, (b) smjera vjetra i (c) sonične temperature za buru #12. Crvena, zelena i plava krivulja se odnose na visine 40, 20 i 10 m.

7 Dodatak B

Logaritmiranjem relacije (2.26) slijedi:

$$\epsilon = \frac{e^{1.5}}{\Lambda} / \ln \quad (7.1)$$

$$\underbrace{\ln \epsilon}_y = \underbrace{1.5}_a \underbrace{\ln e}_x + \underbrace{\ln \Lambda^{-1}}_b. \quad (7.2)$$

Za potrebe metode sume najmanjih kvadrata definira se funkcional S :

$$S = \sum_{i=1}^N (y_i - ax_i - b)^2, \quad (7.3)$$

gdje su y_i zavisne veličine, x_i nezavisne veličine, a koeficijent smjera pravca linearne regresije te b odsječak na ordinati pravca linearne regresije. Budući da tražimo njegov minimum, derivacija po odsječku b mora biti jednaka nuli:

$$\frac{\partial S}{\partial b} = 0 \Rightarrow -2 \sum_{i=1}^N (y_i - ax_i - b) = 0 / : (-2) \quad (7.4)$$

$$\sum_{i=1}^N y_i - a \sum_{i=1}^N x_i - Nb = 0 / : N \quad (7.5)$$

$$\bar{y} - a\bar{x} - b = 0. \quad (7.6)$$

Konačni izraz za odsječak na ordinati b :

$$b = \bar{y} - a\bar{x} = \overline{\ln \epsilon} - 1.5 \overline{\ln e}. \quad (7.7)$$

Usporedbom (7.2) i (7.7) slijedi konačan izraz za Λ (relacija (4.6)).

8 Bibliografija

- Babić, K., Bencetić Klaić, Z. i Večenaj, Ž. (2012) Determining a turbulence averaging time scale by Fourier analysis for the nocturnal boundary layer, *Geofizika*, **29**, 35-51.
- Babić, N., Večenaj, Ž., Horvath, K. i Grisogono, B. (2013a) Evaluation of kinematic vertical eddy fluxes for multiple winter bora events. Poster. *32nd International Conference on Alpine Meteorology* (ICAM2013). Kranjska Gora, Slovenija, 3 - 6. lipanj 2013.
- Babić, N., Večenaj, Ž., Horvath, K. i Grisogono, B. (2013b) TKE budget analysis of a single long-lived winter bora flow. Poster. *Davos Atmosphere and Climate Assembly* (DACA-13). Davos, Švicarska, 8 - 12. srpanj 2013.
- Bajić, A. (1911) Application of the two-layer hydraulic theory on the severe northern Adriatic bora. *Meteorologische Rundschau*, **44**, 129-133.
- Batchelor, G.K. (1959) The Theory of Homogenous Turbulence. *Cambridge University Press*, 197 str.
- Belušić, D., Pasarić, M., Pasarić, Z., Orlić, M. i Grisogono, B. (2006) A note on local and non-local properties of turbulence in the Bora flow. *Meteorol. Z.*, **15**, 301-306.
- Belušić, D., Žagar, M., Grisogono, B. (2007) Numerical simulation of pulsations in the Bora wind. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **133**, 1371-1388.
- Biltoft, C.A. (2001) Some thoughts on local isotropy and the 4/3 lateral to longitudinal velocity spectrum ratio. *Bound.-Layer Meteor.*, **100**, 393-404.
- Bougeault, P., Binder, P., Buzzi, A., Dirks, R., Houze, R., Kuettner, J., Smith, R.B., Steinacker, R. i Volkert, H. (2001) The MAP spatial observing period. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **82**, 433-462.
- Cañadillas, B., Muñoz-Esparza, D., Neumann, T. (2011) Fluxes estimation and the derivation of the atmospheric stability at the offshore mast FINO1. *EWEA Offshore 2011*. (konferencija), Amsterdam, Nizozemska, 29. studeni - 1. prosinac 2011.
- Champagne, F.H. (1978) The finescale structure of the turbulent velocity field. *J. Fluid Mech.*, **86**, 67-108.
- Gohm, A., Mayr, G. J., Fix, A. i Giez, A. (2008) On the onset of bora and the formation of rotors and jumps near a mountain gap. *QJR*, **134**, 21-46.
- Grisogono, B. i 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. i Belušić, D. (2009b) Uvod u mezoskalnu meteorologiju i atmosfersku turbulenciju. *Interna skripta*, 138 str.

- Holton, J.R. (2004) An Introduction to Dynamic Meteorology. *Academic Press*, 4th edition, San Diego, USA, 511 str.
- Horvath, K., Večenaj, Ž., Tomšić, D., Horvath, L., Grisogono, B., Bajić, A., Žibrat, Z., Ivančan-Picek, B., Karadža, N., Baćan, A., Koračin, D. (2010) The WINDEX measurement experiment. Poster. 14th Conference on Mountain Meteorology, Lake Tahoe Vicinity, California, USA, 30. kolovoz - 3. rujan 2010.
- Ivančan-Picek, B. i Tutiš, V. (1996) A case study of a severe Adriatic bora on 28 December 1992. *Tellus* **48A**, 357-367.
- Jurčec, V. (1981) On mesoscale characteristics of bora conditions in Yugoslavia. *Pure Appl. Geophys.*, **119**, 215-227.
- Lee, X., Massman, W. i Law, B. (2004) Handbook of Micrometeorology: A Guide for Surface Flux Measurement and Analysis. *Kluwer Academic*, 250 str.
- Magjarević, V. (2011) Mikroskala ljetne bure na srednjem Jadranu. *Diplomski rad*, Geofizički odsjek PMF-a, 30 str.
- Makjanić, B. (1978) Bura, jugo, etezijska. *Prilozi poznavanju vremena i klime SFRJ*, sv. **5**, 1-43.
- Mellor, G.L. i Yamada, T. (1974) A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers. *J. Atmos. Sci.*, **31**, 1791-1806.
- Metzger, M. i Holmes, H. (2008) Time scales in the unstable atmospheric surface layer. *Boundary-Layer Meteorol.*, **126**, 29-50.
- Oncley, S.P., Friehe, C.A., Bussinger, J.S., Itsweire, E.C., Larue, J.C. i Chang, S.S. (1996) Surface layer fluxes, profiles and turbulence measurements over uniform terrain under near-neutral condition. *J. Atmos. Sci.*, **53**, 1029-1044.
- Orlić, M., Kuzmić, M., Pasarić, Z. (1994) Response of the Adriatic Sea to the bora and sirocco forcing. *Cont. Shelf Res.*, **14**, 91-116.
- Pandžić, K. (2002) Analiza meteoroloških polja i sustava. *Udžbenici Sveučilišta u Zagrebu*, 314 str.
- Reynolds, O. (1895) On the dynamical theory of incompressible viscous fluids and the determination of the criterion, *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A.*, **186**, 123-164.
- 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.

Van der Hoven, I. (1957) Power spectrum of horizontal wind speed in the frequency range from 0.0007 to 900 cycles per hour. *J. Meteorol.*, **14**, 160-164.

Večenaj, Ž. (2005) Procesi makrorazmjera kod olujnog vjetra u Dalmaciji. *Diplomski rad*, Geofizički odsjek PMF-a, 59 str.

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

Večenaj, Ž., De Wekker, S.F.J. i Grubišić, V. (2011) Near surface characteristics of the turbulence structure during a mountain wave event. *J. Appl. Meteor. Climat.* **50**, 1088-1106.

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

Večenaj, Ž. (2012) Karakteristike turbulencije bure. *Doktorski rad*, Geofizički odsjek PMF-a, 83 str.

Yoshino, M.M. (1976) Local Wind Bora. *University of Tokyo Press*, Tokyo, 289 str.