

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
PRIRODOSLOVNO - MATEMATIČKI FAKULTET  
GEOFIZIČKI ODSJEK

Vjeran Magjarević

# MIKROSKALA LJETNE BURE NA SREDNJEM JADRANU

DIPLOMSKI RAD

Voditelj: prof. dr. sc. Branko Grisogono

Suvoditelj: dipl. ing. Željko Večenaj

ZAGREB, 2011.

## **SADRŽAJ**

1. UVOD.....	2
2. TEORIJSKI PREGLED	
2.1. Turbulencija.....	6
2.2. Period osrednjavanja.....	9
3. LOKACIJA I PODACI.....	12
4. ANALIZA PODATAKA.....	15
5. REZULTATI I DISKUSIJA.....	18
6. ZAKLJUČAK.....	25
POPIS LITERATURE.....	27

## 1. UVOD

Na istočnoj obali Jadrana, u zavjetrini Dinarskog gorja, pojavljuje se sjeveroistočni vjetar koji nosi naziv „bura“. Taj naziv potječe od grčke riječi *boreas* koja označava sjeverni vjetar (npr. Pandžić, 1979). Bura je relativno hladan, mahovit, na udare oštar silazni vjetar koji se na Jadranu javlja na zavjetrinskim stranama priobalnih planina od Trsta do Dubrovnika i južnije (npr. Makjanić, 1978; Bajić, 1988, 1989; Tutiš, 1988; Vučetić, 1991). Bura se ne javlja isključivo na području Jadrana, vjetar sličnih karakteristika javlja se i u ostalim dijelovima Europe (područje Urala, neki dijelovi norveške obale, Karpati, Kavkaz...) i svijeta (područje Stjenjaka u Sjevernoj Americi, Japan...).

Zbog svojeg vrlo učestalog pojavljivanja na nekim lokacijama (Senj ima u prosjeku 177 dana bure godišnje; npr. Belušić i Klaić, 2004), bura uvelike utječe na mnoga područja gospodarskih djelatnosti, osobito na promet. U kopnenom prometu uzrokuje poteškoće stvarajući snježne nanose, a najopasnija je na mjestima gdje puše okomito na smjer kretanja vozila. U pomorskom prometu poteškoće nastaju izravno uslijed jakog vjetra i neizravno uslijed valova i „dima mora“. Zbog olujnih brzina i jake mahovitosti<sup>1</sup>, bura stvara vrlo jaku turbulenciju u atmosferi predstavljajući opasnost i u zračnom prometu. Bura nepovoljno djeluje i na biljke jer ih lomi i čupa iz zemlje, kida cvjetove voćaka i isušuje tlo. S druge strane, bura često donosi povoljne biometeorološke uvjete, raznosi i raspršuje zračno onečišćenje, ima sve veću ulogu u iskorištavanju energije vjetra te je značajan čimbenik u proizvodnji kvalitetnog pršuta. Zbog svih tih razloga, bura je već gotovo pola stoljeća tema mnogih istraživanja, a detaljan pregled tih saznanja može se naći u radu Grisogona i Belušića (2009a).

Prostorno-vremenske statističke analize (npr. Poje, 1992) pokazuju da učestalost bure na istočnom Jadranu opada od sjeverozapada prema jugoistoku, a njezina jakost slabi od obale prema pučini, pa je na zapadnoj obali Jadrana ona vrlo rijetko olujna<sup>2</sup> (npr. Večenaj, 2005). Također, bura nije sezonski vjetar, već se javlja tijekom cijele godine, no zimi je u prosjeku jača i dugotrajnija nego ljeti (npr. Jeromel i sur., 2009). Trajanje bure varira od nekoliko sati do nekoliko dana.

Istraživanja makroskalnih karakteristika kod pojave bure (npr. Yoshino, 1976; Jurčec, 1981; Ivančan-Picek i Tutiš, 1996; Heimann, 2001; Horvath i sur., 2006, 2008) pokazuju da na njezin nastanak utječe raspored sinoptičkih sustava nad srednjom Europom i Jadranom,

<sup>1</sup> mahovitost se definira kao omjer maksimalne trenutne brzine i srednje brzine vjetra

<sup>2</sup> uvjet za olujni vjetar:  $\bar{V} \geq 17.2 \text{ m s}^{-1}$  i  $V_{max} > 30 \text{ m s}^{-1}$  (npr. Bašić, 2010.)

odnosno Sredozemljem. Ovisno o baričkom sustavu koji ju je prouzrokovao, bura se dijeli na ciklonalnu, anticiklonalnu i frontalnu (npr. Večenaj, 2005). Ciklonalna ili „mračna“ bura koja donosi naoblaku uz mogućnost pojave oborine, nastaje kada ciklona prelazi preko Jadrana, a iznad srednje Europe jača anticiklona. Na prednjoj strani ciklone tada puše jugo, a na stražnjoj, uz više oblaka i mogućnost kiše, bura. Ako se ciklona zadrži nad Jadranom, tada na njegovom južnom dijelu puše jugo, a na sjevernom bura. Ako dominantan utjecaj ima anticiklona s položajem iznad srednje Europe, koja u potpunosti zahvaća Hrvatsku, javlja se anticiklonalna ili „jasna“ bura uz koju se veže vedro vrijeme, a ona može trajati i do tjedan dana. Frontalna bura nastaje kad nema izraženih sinoptičkih sustava nad Sredozemljem. Uzrokuju je prodori hladnog zraka iza hladne fronte koja dolazi sa sjevera ili sjeverozapada, prelazi Alpe i zahvaća Hrvatsku. Frontalna bura traje kratko, do dva dana, ali može biti vrlo jaka.

Razvojem naprednijih mjerena osamdesetih godina prošlog stoljeća i razvojem numeričkih atmosferskih modela, počela su intenzivna istraživanja mezoskalne dinamike bure. Nakon ALPEX projekta (npr. Mahrt i Gamage, 1987) provedenog 1982.g., početnu teoriju, koja buru opisuje kao katabatički vjetar (npr. Yoshino, 1976; Jurčec, 1981) pri kojem se čest fluida ubrzava niz padinu jer je zbog niže temperature relativno gušća u odnosu na okoliš, zamjenila je tzv. „hidraulička teorija“ (npr. Smith, 1987; Klemp i Durran, 1987; Bajić, 1991; Gohm i sur., 2008). Ta teorija kaže da je glavni pokretački mehanizam jake i olujne bure lomljenje uzgonskih valova pri prelasku toka fluida iz subkritičkog ispred planine u superkritički tok, često popraćen hidrauličkim skokom, u zavjetrini planine. Takvu osnovnu mezoskalnu strukturu bure mezoskalni atmosferski numerički modeli uglavnom uspješno reproduciraju (npr. Enger i Grisogono, 1998; Klaić i sur., 2003; Grubišić, 2004; Belušić i sur., 2007; Telišman Prtenjak i Belušić, 2009; Horvath i sur., 2009), ali kada je riječ o mikroskalnim (turbulentnim) karakteristikama, njihova uspješnost postaje upitna. To je pokazano osjetljivošću izlaza modela na izbor shema parametrizacije turbulencije (npr. Gohm i sur., 2008; Grisogono i Belušić, 2009a). Budući da su atmosferski modeli vrlo bitan alat i u teorijskoj i u primjenjenoj meteorologiji, vrlo je važna ocjena uspješnosti njihovih reprodukcija stvarnog stanja atmosfere, a to se radi pomoću mjerena.

U literaturi postoji tek nekoliko radova koji se bave turbulencijom bure. Jedan od razloga za to je upravo nedostatak odgovarajućih mjerena nužnih za proučavanje mikroskale, a to su visokofrekventna mjerena vjetra i temperature u prostoru (avionska mjerena) i vremenu u jednoj točki (*in situ* mjerena na npr. meteorološkim stupovima/tornjevima). Stoga

je krajem prošlog i početkom ovog stoljeća provedeno nekoliko projekata u sklopu kojih su vršena visokofrekventna mjerena brzine vjetra i temperature duž istočne obale Jadrana.

Avionska mjernja izvršena su u sklopu ALPEX projekta (npr. Kuettner i O'Neill, 1981) i u sklopu MAP projekta (npr. Bougeault i sur., 2001). Mahrt i Gamage (1987) koristili su ALPEX podatke za proučavanje turbulentnih karakteristika paralelnih srednjem toku bure u noćnim atmosferkim graničnim slojevima. U takvim uvjetima, uspjeli su razlučiti nekoliko tipova turbulencije. Večenaj i sur. (2011a) koristili su MAP podatke za proučavanje turbulentnih karakteristika okomitih na buru. Otkrili su da turbulencija u buri uglavnom nastaje lokalno zbog jakog smicanja vjetra.

Početkom prošlog desetljeća izvršena su *in situ* mjerena brzine vjetra (bure) u Senju i Vratniku. Za Senj postoje dva skupa podataka. Prvi je izmjerena u dvomjesječnom periodu (prosinac 2001. – siječanj 2002.) šaličnim anemometrom uzorkovanja 1 Hz. Ovaj instrument mjeri samo horizontalnu komponentu vjetra (2D). Belušić i sur. (2006) koristili su ta mjerena za proučavanje turbulencije bure u smislu njezine lokalnosti i/ili nelokalnosti. Pokazali su da Taylorova hipoteza, nužna za prijelaz iz vremenske u prostornu domenu, vrijedi za odabранe slučajeve. Iz analize su isključili pulsacije (pojave na periodima između 1 i 10 min) te su, između ostalog, preliminarno pokazali da u slučaju lokalne turbulencije (pojave na periodima kraćim od 1 min) vrijedi linearan odnos između standardne devijacije i srednje brzine vjetra, a to odgovara teorijskim predviđanjima (npr. Stull, 1988). Drugi skup podataka dobiven je mjeranjem u periodu nešto duljem od 2 godine (ožujak 2004. – lipanj 2006.) ultrasoničnim anemometrom koji mjeri sve tri komponente vjetra uzorkovanjem od 4 Hz. Unutar tog perioda, istodobno su istim instrumentom vršena mjerena i u Vratniku (listopad 2004. – rujan 2005.). Belušić i Klaić (2006) su koristili taj skup podataka za ocjenu uspješnosti rekonstrukcije odabranih slučajeva numeričkim modelom. Pokazali su da vrijednost turbulentne kinetičke energije (TKE)<sup>3</sup> u buri može postići vrijednosti i od  $30 \text{ J kg}^{-1}$ . Večenaj i sur. (2010) su na tim podacima prvi put procijenili disipaciju TKE za buru.

Sva navedena mjerena izvedena su na sjevernom dijelu Jadrana, na samo jednom vertikalnom nivou, dok na srednjem i južnom Jadranu takva mjerena donedavno nisu postojala. Bura je intenzivnije proučavana na sjevernom Jadranu jer je tamo, prema dostupnim mjeranjima, najjača i stoga znanstvenicima najzanimljivija. Zahvaljujući razvoju korištenja alternativnih izvora energije, od kojih je energija vjetra za područje Europe jedan

---

<sup>3</sup>  $TKE \equiv \frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})$ , gdje  $u', v', w'$  predstavljaju turbulentne fluktuacije pojedine komponente brzine

od najznačajnijih (npr. <http://www.windex.hr/>), karakteristike vjetra srednjeg i južnog Jadrana postaju sve važnije.

Kako je na srednjem i južnom Jadranu bura slabija i manje učestala, uvjeti izgradnje vjetroelektrana su povoljniji nego na sjevernom Jadranu, a da bi se energetski potencijal nekog područja detaljno istražio, potrebna su upravo visokofrekventna mjerena na meteorološkim tornjevima s nekoliko nivoa. Od travnja 2010. do lipnja 2011. izvršena su takva mjerena na Pometenom brdu u zaleđu Splita (planirano područje budućih vjetroelektrana) i na tim se podacima temelji ovaj rad.

Za izračun TKE i njezine disipacije, veličina važnih za usporedbu s numeričkim prognostičkim modelima i ocjenu naprezanja materijala vjetroelektrana, potrebno je iz mjerena odrediti turbulentnu skalu tj. period osrednjavanja turbulentnih veličina. Cilj ovog rada je jednostavan i važan: procijeniti period osrednjavanja turbulencije bure iz podataka dobivenih ultrasoničnim anemometrima postavljenih na tri nivoa na Pometenom brdu u blizini Dugopolja. Za procjenu je upotrebljena metoda ogiva, jedan od alata koji se tradicionalno koristi u istraživanju atmosferske turbulencije. Pokazat će se da „a priori“ osrednjavanje od 10 minuta koje se nerijetko koristi u praksi (npr. Bajić, 2011), općenito nije prihvatljivo za ljetnu buru srednjeg Jadrana.

Ovaj diplomski rad nastavak je i proširenje konferencijskog rada Magjarevića i sur. (2011) koji je pobudio veliko zanimanje nakon što je prikazan na 31. međunarodnoj konferenciji Alpske meteorologije u Aviemoreu (Škotska).

## 2. TEORIJSKI PREGLED

### 2.1. Turbulencija

Vrlo je teško dati točnu definiciju turbulencije, no prije svega potrebno je reći da turbulencija nije karakteristika fluida, nego strujanja fluida (npr. Grisogono i Belušić, 2009b). Definicija turbulencije mogla bi glasiti da je to sustav mehanizama pomoću kojeg tokovi fluida nastoje poništiti uzroke nestabilnosti izjednačavajući prostorne gradijente u strujanju (npr. Tennekes i Lumely, 1972). Mnogo preciznije informacije o tome što je turbulencija, daje popis svojstava koje strujanje mora zadovoljiti da bismo ga nazvali turbulentnim (npr. Stull, 1988). Turbulentno strujanje je:

- neregularno (mora postojati jaka slučajna komponenta)
- difuzno (što znači da nema povratka u početno stanje)
- spontano (spontano se širi u vremenu i u sve tri dimenzije prostora)
- kontinuirano (relevantne prostorne skale turbulencije više su redova veličine dulje od srednjeg slobodnog puta molekula)
- ima fluktuacije vrtložnosti u tri prostorne dimenzije
- advektivni član mora biti puno veći od viskoznog ( $R_e^4$  mora biti vrlo velik)
- disipativno (ako ostane bez svojeg izvora, nakon nekog vremena nestaje)

Atmosfersko strujanje je po prirodi vrlo kaotično s mnogo stupnjeva slobode. U slobodnoj atmosferi turbulencija se može zanemariti, no u graničnom sloju jednadžbe gibanja moraju uključivati i turbulentne efekte.

Teorijski problem turbulencije se svodi na postojanje većeg broja nepoznanica u odnosu na broj prognostičkih jednadžbi, pa je nužno postavljanje tzv. zatvarajuće pretpostavke. U principu, postoji neograničen broj praktičnih izbora redova zatvaranja turbulentne sheme, a kompleksnost raste s povećanjem reda zatvaranja. Prvi red zatvaranja parametrizira nepoznate turbulentne tokove pomoću vertikalne raspodjele srednjih stanja promatranih veličina uz prikladno dijagnosticiran koeficijent proporcionalnosti između tih srednjih stanja i turbulentnih tokova (npr. Grisogono i Belušić, 2009b). Primjer takvog zatvaranja je tzv. K-teorija<sup>5</sup> (npr. Frisch, 1995).

---

<sup>4</sup> $R_e$  označava Reynoldsov broj koji je definiran kao omjer advektivnog i viskoznog člana  $R_e \equiv \frac{|\bar{U} \cdot \nabla \bar{U}|}{|\nu \cdot \nabla^2 \bar{U}|}$

<sup>5</sup> Tradicionalni pristup problemu zatvaranja je pretpostavka da se turbulentni vrtlozi ponašaju kvalitativno slično molekularnoj difuziji pa koeficijente turbulentne difuznosti označavamo sa  $K_m$  i  $K_h$  ( $m=momentum$ ,  $h=heat$ ) od čega dolazi naziv K-teorija

U turbulentnom strujanju fluida vremenske fluktacije sve tri komponente polja brzine ( $u$ ,  $v$ ,  $w$ ), potencijalne temperature ( $\theta$ ), tlaka ( $p$ ) itd. posljedica su prolaska vrtloga različitih dimenzija kroz točku u kojoj se vrše mjerena spomenutih varijabli (npr. Stull, 1988). Kako bi ta mjerena vjerodostojno opisivala stanje na većoj skali (gdje nas ne zanima svaki pojedini vrtlog, već njihovo ukupno djelovanje), potrebno je napraviti osrednjavanje strujanja na odgovarajućem intervalu koji će isključiti efekte neturbulentnih procesa (sve pojave od mezoskale<sup>6</sup> prema velikim skalama). U uspješnom modeliranju turbulencije vjerojatno je najveći problem upravo dekompozicija i vremensko osrednjavanje osnovnih polja.

Za dekompoziciju osnovnih polja može se koristiti Reynoldsovo osrednjavanje (npr. Holton, 2004). Pretpostavka je da postoji razlika između većih skala i mikroskale gibanja. Također, pretpostavlja se da se srednje vrijednosti varijabli pojedinih polja u turbulentnom strujanju mogu dobro definirati. Ako su te pretpostavke zadovoljene, određeno meteorološko polje  $X$  može se rastaviti na sporo promjenjivo srednje polje,  $\bar{X}$ , i brzo varirajuću turbulentnu komponentu, tj. perturbaciju,  $X'$ , tog polja (npr. Stull, 1988) npr.

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

Srednjak perturbacije (fluktuacije) po definiciji iščezava ( $\bar{X}' = 0$ ). Iz toga proizlazi da umnošci srednjaka i perturbacija nekih dviju veličina  $X$  i  $Y$ , nakon primjene Reynoldsovog osrednjavanja, također iščezavaju ( $\bar{X}'\bar{Y}' = 0$ ). Stoga vrijedi da je:

$$\bar{XY} = \overline{(X' + \bar{X})(Y' + \bar{Y})} = \bar{X}\bar{Y} + \overline{X'Y'} . \quad (2)$$

Upravo je traženje odgovarajućeg perioda osrednjavanja za naš skup podataka, uz Reynoldsove pretpostavke, cilj i glavna tema ovog rada. Uz takve pretpostavke osnovne jednadžbe gibanja uz Boussinesqovu aproksimaciju<sup>7</sup>, jednadžba termodinamike i kontinuiteta poprimaju sljedeće oblike:

$$\frac{\bar{D}\bar{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + f\bar{v} - \left[ \frac{\partial}{\partial x}(\bar{u}'\bar{u}') + \frac{\partial}{\partial y}(\bar{u}'\bar{v}') + \frac{\partial}{\partial z}(\bar{u}'\bar{w}') \right] + F_{rx} , \quad (3)$$

$$\frac{\bar{D}\bar{v}}{Dt} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} - f\bar{u} - \left[ \frac{\partial}{\partial x}(\bar{v}'\bar{u}') + \frac{\partial}{\partial y}(\bar{v}'\bar{v}') + \frac{\partial}{\partial z}(\bar{v}'\bar{w}') \right] + F_{ry} , \quad (4)$$

---

<sup>6</sup> mezoskala - skala procesa čije je trajanje u rasponu od desetak minuta do jednog dana. Horizontalne dimenzije mezoskalnih procesa su od otprilike 2 km do otprilike 1000 km

<sup>7</sup> Boussinesqova aproksimacija predstavlja jedno od najvažnijih pojednostavljenja u jednadžbama graničnog sloja. Ukratko, promjene gustoće mogu se zanemariti, a gustoća zamijeniti srednjom vrijednošću u svim članovima osim u uzgonskom članu u jednadžbi vertikalnog gibanja.

$$\frac{\bar{D}\bar{w}}{Dt} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial z} + g \frac{\bar{\theta}}{\theta_0} - \left[ \frac{\partial}{\partial x} (\bar{w}'\bar{u}') + \frac{\partial}{\partial y} (\bar{w}'\bar{v}') + \frac{\partial}{\partial z} (\bar{w}'\bar{w}') \right] + F_{rz}, \quad (5)$$

$$\frac{\bar{D}\bar{\theta}}{Dt} = -\bar{w} \frac{d\theta_0}{dz} - \left[ \frac{\partial}{\partial x} (\bar{u}'\bar{\theta}') + \frac{\partial}{\partial y} (\bar{v}'\bar{\theta}') + \frac{\partial}{\partial z} (\bar{w}'\bar{\theta}') \right], \quad (6)$$

$$\left[ \frac{\partial \bar{u}'}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}'}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}'}{\partial z} \right] = 0, \quad (7)$$

gdje su  $u$ ,  $v$  i  $w$  komponente brzina u  $xyz$  sustavu,  $p$  je tlak zraka,  $\theta$  je potencijalna temperatura,  $\rho_0$  je gustoća fluida,  $g$  je ubrzanje sile teže, a članovi  $F_{rx}$ ,  $F_{ry}$  i  $F_{rz}$  označavaju promjenu srednjeg stanja promatranog polja zbog viskoznog trenja. Članovi u uglatim zgradama na desnim stranama jednadžbi (3) – (6) su tzv. kovarijance i predstavljaju turbulentne tokove: vertikalni turbulentni tok topline u kinematičkom obliku,  $\bar{\theta}'\bar{w}'$ , vertikalni turbulentni tok zonalnog impulsa  $x$ -smjera,  $\bar{u}'\bar{w}' = \bar{w}'\bar{u}'$ , itd. Magnitude tih tokova u turbulentnosti su istog reda veličine kao i ostali doprinosi u jednadžbama i zbog toga ih je nemoguće zanemariti. Dodatna pojednostavljenja i/ili komplikacije (često ne male) u prognostičke jednadžbe turbulentnog gibanja unose se odabirom reda zatvaranja. Jednadžbe od (3) do (7) osnova su dinamičke jezgre atmosferskih numeričkih modela koji u principu ne razlučuju turbulentnu strujanje, već je parametriziraju ranije spomenutim pretpostavkama zatvaranja.

Pogrešno ocijenjen period osrednjavanja ima nezanemariv učinak na izračune parametara turbulentnosti (TKE, njezine disipacije, itd.) potrebnih za praktične svrhe i za ocjenu uspješnosti modela. Prekratkim osrednjavanjem mogu se izgubiti fenomeni na vremenskim skalamama koje još uvijek spadaju u turbulentnost, što uzrokuje podcenjivanje navedenih parametara. S druge strane, preugrim osrednjavanjem u turbulentnost mogu biti uključeni fenomeni koji spadaju u mezoskalu, čime navedeni parametri turbulentnosti bivaju precijenjeni. Imajući to na umu, tema ovog rada je traženje odgovarajuće vremenske skale osrednjavanja turbulentnih procesa na temelju rezultata mjerena s Pometenog brda (zaleđe Splita).

## 2.2. Period osrednjavanja

Da bi se Reynoldsova dekompozicija (1) mogla primjeniti u praksi, rezultati mjerena atmosferskih pojava, koji su po prirodi nestacionarni (u statističkom smislu), najprije se moraju transformirati u vremenske nizove koji su statistički stacionarni. To se može napraviti procesom osrednjavanja (npr. Stull, 1988). Izbor odgovarajuće vremenske skale, tj. perioda osrednjavanja za turbulentiju bure srednjeg Jadrana, središnje je pitanje i tema ovog rada.

Postoji više načina određivanja perioda osrednjavanja turbulentnog strujanja. Ponekad se on, što često i nije najbolje rješenje, odabire proizvoljno ili po nekim standardima (npr. Lee i sur., 2004; Bajić, 2011). Tradicionalni alat za određivanje perioda osrednjavanja je Fourierova spektralna analiza gdje je jedan od načina traženje unaprijed prepostavljenog lokalnog minimuma u Fourierovim spektrima i/ili kosektrima snage mjereneh veličina (komponenti brzine vjetra i temperature) koji na neki način označava granicu između mezoskale i turbulentne skale (npr. Metzger i Holmes, 2008). Drugi način određivanja je tzv. metoda „ogiva“ (npr. Oncley i sur., 1996) koja se temelji na proračunu Fourierovih kosektara turbulentnih tokova topline i impulsa.

Fourierov kosektar,  $Co_{pq}(f)$ , nekih dviju varijabli  $p$  i  $q$  je zapravo Fourierov transform korelacijske funkcije  $R_{pq}(\tau)$  definirane kao matematičko očekivanje,  $E$ , skalarnog produkta fluktuacija varijabli (npr. Press i sur., 1989):

$$R_{pq}(\tau) = E[p'(t + \tau)q'(t)] \quad (8)$$

gdje  $\tau$  označava vremenski posmak. Korelacijska funkcija se može interpretirati kao mjera povezanosti varijabli  $p$  i  $q$ ; što su varijable povezani, to će se njihove fluktuacije ponašati sličnije, a apsolutna vrijednost korelacije će biti veća. Fourierov kosektar je tada definiran kao:

$$Co_{pq}(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_{pq}(\tau) \cdot e^{-if\tau} d\tau \quad (9)$$

i može se interpretirati kao mjera doprinosa ukupnoj korelaciji na pojedinoj frekvenciji  $f$ . Ukoliko se radi s jednom varijablom (npr.  $p$ ), (8) postaje autokorelacijska funkcija,  $R_{pp}(\tau)$ , a (9) Fourierov spektar,  $Co_{pp}(f) = S_p(f)$ , varijable  $p$ . Ako se Fourierov kosektar,  $Co_{pq}(f)$ , sumira po svim frekvencijama, dobivena suma ima značenje ukupne kovarijance varijabli  $p$  i  $q$ . U jednadžbama (3) – (6), ulogu varijabli  $p$  i  $q$  imaju tri komponente brzine ( $u$ ,  $v$ ,  $w$ ) i

potencijalna temperatura ( $\theta$ ), a njihove međusobne kombinacije ukupnih kovarijanci predstavljaju turbulentne tokove impulsa i topline.

Sukladno gore opisanom, „ogiva“,  $Og_{pq}(f)$ , je definirana kao kumulativni integral Fourierovog kospektra turbulentnog toka (fluksa),  $Co_{pq}$ , nekih dviju varijabli  $p$  i  $q$  od najvećih prema najmanjim frekvencijama  $f$ :

$$Og_{pq}(f) = \int_{\infty}^f Co_{pq}(f') df'. \quad (10)$$

Ako ogiva, zadana jednadžbom (10), konvergira počevši od neke frekvencije  $f_c$  prema nižima, pretpostavlja se da kospektar dotičnog turbulentnog toka na frekvencijama nižim od  $f_c$  ima zanemariv doprinos ukupnom turbulentnom toku, te da se period koji odgovara toj frekvenciji može uzeti kao period osrednjavanja pri proračunu turbulentnih veličina. Često se u literaturi pokazuje da ogive turbulentnog toka topline konkluzivnije konvergiraju od ogiva turbulentnog toka impulsa (npr. Oncley i sur., 1996; Lee i sur., 2004; Večenaj i sur., 2011b) što će se pokazati i u ovom radu.

Elegantan način je raditi s normiranim ogivama. Na primjer, normirana ogiva kospektra toplinskog toka (npr. Moncrieff i sur., 2004) definirana je kao:

$$Ogn_{w\theta}(f) = \frac{1}{\overline{w'\theta'}} \int_{f_N}^f Co_{w\theta}(s) ds, \quad (11)$$

gdje  $Co_{w\theta}$  predstavlja kospektar vertikalnog toplinskog toka,  $f_N$  označava Nyquistovu frekvenciju<sup>8</sup>, a  $\overline{w'\theta'}$  označava ukupan vertikalni toplinski tok. Budući da je integral ispod kospektralne krivulje jednak ukupnom toku, normirana ogiva je prema (11) omeđena tako da vrijedi (npr. Metzger i Holmes, 2008):

$$0 \leq Ogn_{w\theta}(f) \leq 1 \quad (12)$$

Frekvencija  $f_c$  iz koje se dobije period osrednjavanja ( $T = f_c^{-1}$ ) može biti definirana kao frekvencija pri kojoj normirana ogiva postiže vrijednost blisku 1. U ovom diplomskom radu,  $f_c$  je definirana eksplicitno kao:

---

<sup>8</sup> Za određenu frekvenciju kojom se uzimaju uzorci mjerene veličine maksimalna frekvencija signala koja se može točno prikazati, a da se ne javi *aliasing* efekt (predstavljanje više frekvencije nižom), naziva se Nyquistova frekvencija i ona iznosi pola frekvencije uzimanja uzorka. U našem slučaju radi se o uzorkovanju od 5Hz, pa je  $f_N = 2.5Hz$

$$Ogn_{w\theta}(f_c) = 0.95. \quad (13)$$

Fizički,  $f_c$  predstavlja graničnu (engl. *cut-off*) frekvenciju pri čemu sva turbulentna gibanja s  $f < f_c$  ukupnom vertikalnom toplinskom toku pridonose manje od 5%. Vremenska skala izvedena iz inverzne frekvencije predstavlja kritičnu vremensku skalu odvajajući lokalna turbulentna strujanja, koja pokreću turbulenciju površinskog sloja (imaju frekvencije  $f > f_c$ ) od mezoskalnih tokova povezanih s dnevnim fluktuacijama i promjenama vremenskih svojstava (imaju frekvencije  $f < f_c$ ).

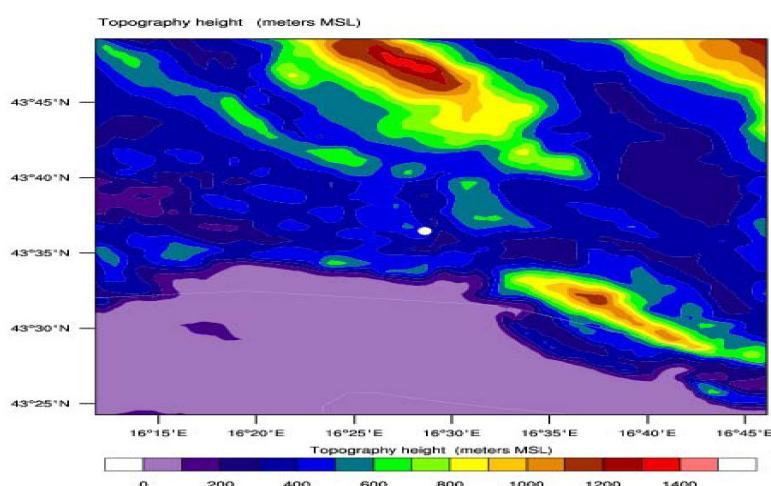
Navedene spektralne metode su u radu primjenjene na podatke o brzini vjetra i temperaturi u finoj rezoluciji, a u svrhu traženja granične frekvencije, odnosno perioda osrednjavanja turbulentnog strujanja, za ljetnu buru na srednjem Jadranu.

### 3. LOKACIJA I PODACI

Pometeno brdo nalazi se u blizini naselja Prugovo, sjeverozapadno od Dugopolja u zaleđu Splita. Točan geografski položaj je  $43^{\circ}36'28.9''N$ ,  $16^{\circ}28'37.4''E$ , s najvišim vrhom na 618 m iznad srednje razine mora. Položaj i visina topografije prikazani su na slikama 1 i 2 (npr. Magjarević i sur., 2011).

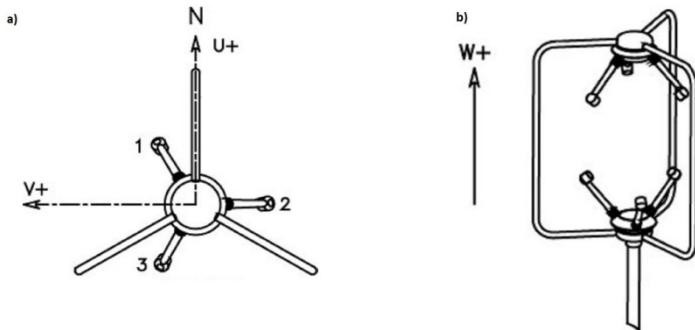


Slika 1. Istočna obala Jadrana (dolje lijevo) s označenom lokacijom Pometenog brda (crveni kružić). Gore desno: uvećani prikaz lokacije Pometenog brda.



Slika 2. Teren proučavanog područja kako ga prepoznae numerički meteorološki model WRF. Meteorološki tornja s instrumentima na Pometenom brdu je prikazan bijelim kružićem u sredini.

Za mjerjenja su korištena tri „WindMaster Pro“ ultrasonična anemometra proizvođača Gill Instruments koji mjere sve tri komponente brzine vjetra i temperaturu frekvencijom uzorkovanja 5 Hz. Ovi anemometri imaju specifičan koordinatni sustav kojemu je os  $x$  orijentirana prema sjeveru, a os  $y$  prema zapadu (slika 3), što je trebalo imati na umu pri transformaciji komponenti brzina vjetra u istočnu i sjevernu komponentu (poštujуći oznake na slici 3,  $u_x = -V+$ , a  $u_y = U+$ ).



**Slika 3.** (a) Koordinatni sustav anemometara postavljenih na meteorološki toranj na Pomenom brdu gledan odozgo:  $x$  os orijentirana je prema sjeveru a  $y$  os prema zapadu. Brojevima 1-3 naznačeni su položaji ultrasoničnih senzora; (b) skica postavljenog anemometra na vertikalni stup, s naznakom smjera vertikalne komponente vjetra ( $w$ ).

Anemometri su postavljeni na meteorološki toranj (slika 4) visine 60 m na tri visine (10, 20 i 40 m). Svaki anemometar je postavljen na jedan kraj aluminijskog kraka duljine 2 m dok je drugi kraj učvršćen za toranj na način da je anemometar ispružen u smjeru SW-NE gledajući u buru. Baza tornja je istostraničan trokut duljine stranice 30 cm tako da je svaki anemometar udaljen 1.7 m od tornja što minimizira utjecaj samog tornja na mjerjenja. Anemometri su serijski bili spojeni na „data logger CR1000“ proizvođača Campbell Scientific čija je uloga sinkronizacija, obrada i zapisivanje mjerena. Cijeli sustav bio je autonoman jer je napajan sunčevom energijom.

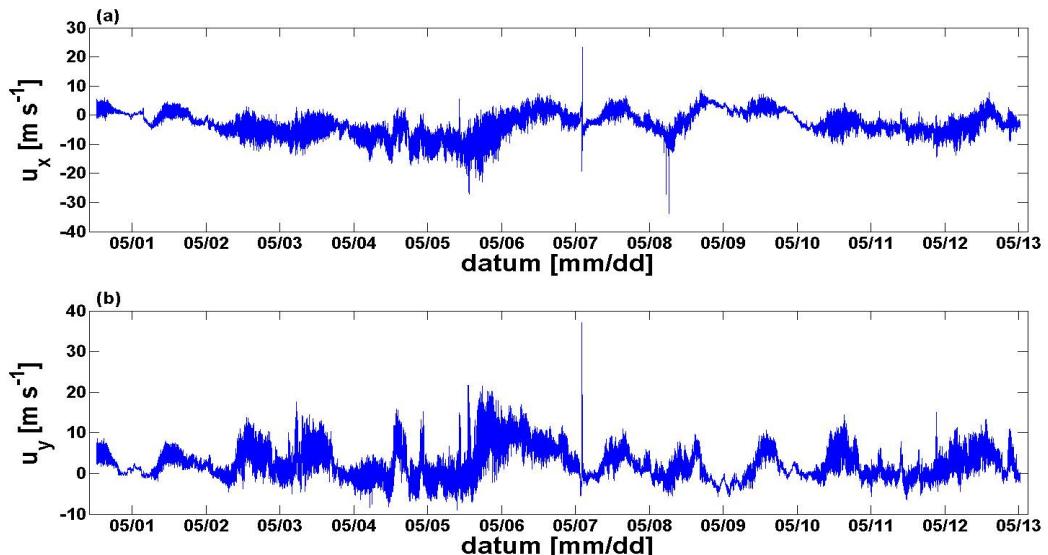


**Slika 4.** Meteorološki toranj postavljen na Pomenom brdu (u blizini Dugopolja). Profesionalni penjač postavlja anemometar na visini od 10 m. Crvenim kružićima naznačeni su već postavljeni anemometri na visinama 20 m i 40 m.

Pohranjene *sirove* podatke (slika 5) bilo je potrebno grafički prikazati (slika 6) kako bi se vizualnom analizom uočili loši podaci. Lošim podatkom (npr. za brzinu bilo kojeg smjera) smatrao se onaj koji je u nizu od 10 uzastopnih podataka izlazio iz granica  $\pm 3.5$  standardnih devijacija tog niza (npr. Vickers i Mahrt, 1997), te su oni automatskom programskom procedurom izbačeni iz niza nakon čega su linearno interpolirani. Količina izbačenih podataka u prosjeku nije veća od 0,001 %. Nakon takve analize i pročišćavanja podataka moglo se pristupiti daljnjoj obradi, odnosno izdvajanju bura te izradi spektara, kosektara i njihovih ogiva.

```
"2010-04-30 12:24:20.2",1,5.93,-0.68,0.08,18.54,5.28,-0.1,0.41,22.43,4.81,-0.86,0.09,22.62
"2010-04-30 12:24:20.4",2,5.8,-0.45,0.25,18.55,5.51,-0.19,0.58,22.4,3.98,-0.64,0.44,22.57
"2010-04-30 12:24:20.6",3,6.06,-0.53,0.17,18.56,5.27,-0.26,0.59,22.4,3.82,-0.53,0.85,22.49
"2010-04-30 12:24:20.8",4,5.43,-0.3,0.07,18.58,5.24,-0.29,0.56,22.39,4.46,-0.03,0.63,22.58
"2010-04-30 12:24:21",5,5.24,-0.17,0.38,18.57,5.37,-0.24,0.71,22.41,4.16,-0.32,1.32,22.68
"2010-04-30 12:24:21.2",6,5.27,0.19,0.19,18.57,5.31,-0.01,0.14,22.41,4.75,-0.66,0.96,22.75
"2010-04-30 12:24:21.4",7,5.05,0.14,0.12,18.55,5.19,-0.1,0.13,22.41,4.5,-0.05,0.76,22.85
"2010-04-30 12:24:21.6",8,4.95,0.02,-0.28,18.53,5.11,0.08,-0.27,22.37,4.38,0.37,0.41,22.91
"2010-04-30 12:24:21.8",9,4.7,0.14,-0.14,18.55,5.05,0,-0.33,22.41,4.8,0.98,0.18,22.86
"2010-04-30 12:24:22",10,4.63,-0.11,-0.32,18.54,5.23,-0.25,-0.09,22.39,4.95,0.65,-0.06,22.63
```

**Slika 5.** Prvih 10 redaka sirovih podataka zapisanih u ASCI kodu. Pod navodnicima su datum i vrijeme izmjerjenog podatka sa preciznošću 0.2 sekunde (uzorkovanje od 5 Hz). Nakon toga slijedi redni broj mjerena, te redom vrijednosti  $u_y$ , -  $u_x$  i  $w$  komponenti brzine vjetra i temperature za anemometre redom na 40 m, 20 m i 10 m.



**Slika 6.** Prikaz originalnih podataka za dvije horizontalne komponente brzine vjetra, (a)  $u_x$ , (b)  $u_y$  u ovisnosti o trajanju. Na osi  $x$  označen je početak dana koji se prikazuje. Piki na pojedinim grafovima označavaju loše podatke koji su nakon vizualne analize i automatske procedure uklonjeni iz vremenskog niza.

Zbog velike učestalosti uzorkovanja i broja nivoa na kojima je mjereno izvršeno, ovo je jedinstven i najdetaljniji skup obrađenih podataka o vjetru na jednom mjestu u Hrvatskoj. Mjerenja su vršena od travnja 2010. do lipnja 2011., u okviru projekata i združenog istraživanja Državnog hidrometeorološkog zavoda (DHMZ) i Geofizičkog odsjeka PMF-a.

## 4. ANALIZA PODATAKA

U ovom radu analizirani su tromjesečni nizovi podataka dobiveni anemometrima s tri visine u razdoblju od 30. travnja do 29. srpnja 2010. S ciljem da se detektiraju bure, najprije su iz tih nizova izdvojene sve epizode vjetra koje traju dulje od 3 h, a 10-minutni srednjaci smjera vjetra im se kreću u rasponu od  $0^\circ$  do  $90^\circ$  (ovdje nazvan NE vjetar). Na temelju navedenih kriterija, na različitim visinama izdvojen je različiti broj epizoda NE vjetra (Tablica 1). Uzrok manjeg broja epizoda na visini 10 m leži u tome što anemometar postavljen na toj visini, iz još uvijek nepoznatih razloga, nije vršio mjerena u razdoblju od 29. lipnja do 11. srpnja.

visina mjerena [m]	broj izdvojenih epizoda bure
10	41
20	62
40	64

**Tablica 1.** Ukupan broj izdvojenih bura za pojedinu visinu mjerena.

Za definiciju epizode bure pojačan je kriterij trajanja (trajanje dulje od 10 h) te je dodan kriterij minimalne brzine (srednja horizontalna brzina,  $V_{tot} = \sqrt{u^2 + v^2}$ ,  $\geq 4.5 \text{ m s}^{-1}$ ; vrijednost  $4.5 \text{ m s}^{-1}$  uzeta je da se sačuvaju epizode bure čija je srednja horizontalna brzina manja, ali vrlo bliska  $5 \text{ m s}^{-1}$ ). Konačno, iz takvog skupa NE vjetra (tablica 1), izdvojeno je ukupno 19 bura koje su zadovoljavale zadane kriterije (tablica 2).

Radi lakše analize, pojedine su bure dodatno skraćene kako bi svaka od njih trajala točno određeni broj punih sati. Na primjer, epizoda bure koja je trajala otprilike 14 sati i 20 minuta skraćena je na trajanje od točno 14 sati. Također, za svaku pojedinu buru izračunat je srednji smjer horizontalnog vjetra te je koordinatni sustav zarotiran (npr. Večenaj i sur., 2010) na način da pozitivna  $x$  os pokazuje od NE prema SW (u smjeru srednjeg vjetra i pripadna komponenta brzine je  $u$ ) a os  $y$  je okomita na nju pokazujući od NW prema SE (pripadna komponenta brzine je  $v$ ). Sva daljnja analiza rađena je u tom novom koordinatnom sustavu. Primjenjena je Fourierova spektralna analiza opisana u poglavlju 2.2, uz korištenje diskretne inačice Fourierovog transforma, tzv. „Fast-Fourier transform“ (npr. Press i sur., 1989). Analiza se temelji na prozorima podataka koji sadrže  $2^{14}$  podataka (što odgovara periodu  $\approx 1$  h) uz 50 % preklapanja. Spektri i kospektri su računati za svaki prozor posebno, nakon čega

su usrednjeni te je dobivena srednja procjena spektra/kospektra za pojedinu buru. Svi proračuni rađeni su u programskom sustavu Matlab.

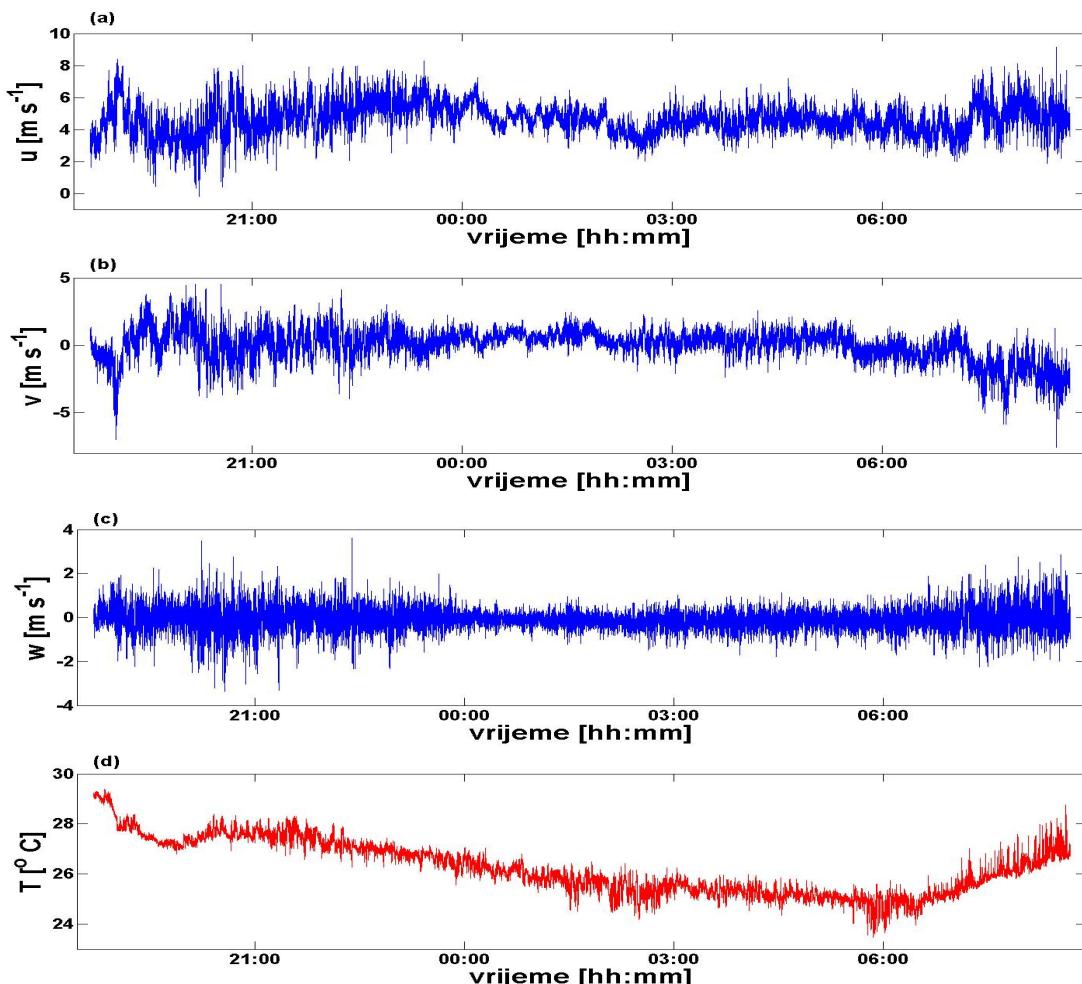
Najprije su izračunati spektri snage sve tri komponente brzine svih 19 bura s ciljem određivanja perioda osrednjavanja prema unaprijed prepostavljenom lokalnom minimumu u spektru. Za razliku od Večenaja i sur. (2010), koji su za slučaj bure u Senju jasno uočili taj minimum na periodima  $\approx 10$  min, a koji označava gornju granicu perioda na kojima se javljaju pulsacije (npr. Belušić i sur., 2006), ovdje ni u jednom spektru ni za jednu buru nije uočen značajan minimum (nije prikazano). Stoga je provedena daljnja obrada podataka i izrada ogiva vertikalnog toplinskog toka i vertikalnog toka impulsa. Budući da određivanje konvergencije vizualnom analizom ogiva nije dovoljno objektivna metoda (npr. Oncley i sur., 1996), u ovom radu su korištene normirane ogive (11) na koje je odgovarajućim algoritmom primijenjen kriterij (13). Rezultati analize metodom ogiva i na njima zasnovanom pokušaju procjene intervala osrednjavanja za ljetnu buru na srednjem Jadranu opisani su u sljedećem poglavlju.

redni broj bure	period trajanja	trajanje bure [h]	srednja horizontalna brzina bure [m/s]						period osrednjavanja [min]					
			40m		20m		10m		40m		20m		10m	
			V <sub>tot</sub>	σ	V <sub>tot</sub>	σ	V <sub>tot</sub>	σ	T <sub>aver</sub>	σ	T <sub>aver</sub>	σ	T <sub>aver</sub>	σ
1	18.5. 21:43 - 19.5. 10:43	13	6,37	1,98	6,02	2,04	5,02	1,93	27,3	-	20,5	9,7	22,7	6,4
2	19.5. 19:53 - 21.5. 21:53	50	9,60	3,00	8,95	3,07	7,40	3,10	13,0	7,7	16,8	10,5	14,8	10,4
3	22.5. 09:08 - 23.5. 11:08	26	6,61	2,55	5,91	2,25	4,90	1,97	21,8	9,4	16,7	8,2	9,9	5,7
4	23.5. 20:43 - 24.5. 08:43	12	5,32	1,21	5,20	1,23	4,66	1,23	10,2	6,7	13,7	4,6	17,3	8,8
5	04.6. 21:36 - 06.6. 07:36	34	7,31	2,90	6,91	2,77	5,91	2,51	18,6	10,5	21,6	11,4	16,1	10,1
6	22.6. 16:56 - 25.6. 14:56	70	9,13	2,87	8,63	2,83	7,21	2,66	18,4	8,7	17,4	7,9	14,9	8,3
7	27.6. 09:16 - 29.6. 12:16	51	7,11	2,77	6,51	2,53	5,76	2,43	17,5	7,5	18,7	7,8	12,2	10,3
8	29.6. 20:06 - 30.6. 14:06	18	5,92	1,62	5,48	1,61	NaN	-	27,3	-	24,3	5,3	NaN	-
9	30.6. 15:02 - 01.7. 15:02	24	6,79	2,63	6,18	2,55	NaN	-	11,0	6,2	17,5	10,3	NaN	-
10	01.7. 19:17 - 02.7. 14:17	19	5,76	1,99	5,00	1,88	NaN	-	15,0	10,8	19,7	6,9	NaN	-
11	02.7. 18:52 - 03.7. 10:52	16	6,53	1,79	6,53	1,66	NaN	-	13,7	6,4	10,0	1,3	NaN	-
12	05.7. 15:02 - 06.7. 13:02	22	4,96	1,59	4,76	1,60	NaN	-	16,8	12,4	15,0	10,8	NaN	-
13	06.7. 18:52 - 08.7. 12:52	42	9,49	2,51	8,88	2,39	NaN	-	15,9	10,6	12,2	9,8	NaN	-
14	08.7. 22:12 - 09.7. 15:12	17	4,98	2,14	4,82	2,16	NaN	-	16,7	2,6	18,8	8,2	NaN	-
15	09.7. 23:47 - 10.7. 13:47	14	5,84	1,77	5,69	1,80	NaN	-	20,5	9,7	22,8	7,9	NaN	-
16	10.7. 18:37 - 11.7. 09:37	15	6,23	1,33	6,05	1,34	NaN	-	7,3	4,0	6,5	2,3	NaN	-
17	18.7. 16:06 - 19.7. 09:06	17	6,89	1,75	6,80	1,71	6,08	1,63	13,7	6,4	14,6	5,1	7,8	-
18	19.7. 18:41 - 20.7. 08:41	14	4,78	0,93	4,65	0,97	4,23	0,96	27,3	-	27,3	-	20,5	9,7
19	24.7. 20:37 - 27.7. 10:37	62	11,31	4,37	10,61	4,28	9,01	3,94	17,4	9,3	16,5	8,8	12,8	6,7

**Tablica 2.** Vrijednosti srednje horizontalne brzine vjetra ( $V_{tot}$ ) i perioda osrednjavanja ( $T_{aver}$ ) svake izdvojene bure s pripadajućim standarnim devijacijama ( $\sigma$ ). Iz nepoznatih razloga anemometar postavljen na visini 10 m nije vršio mjerjenja u razdoblju od 29. lipnja do 11. srpnja, pa stoga ti podaci nedostaju (NaN).

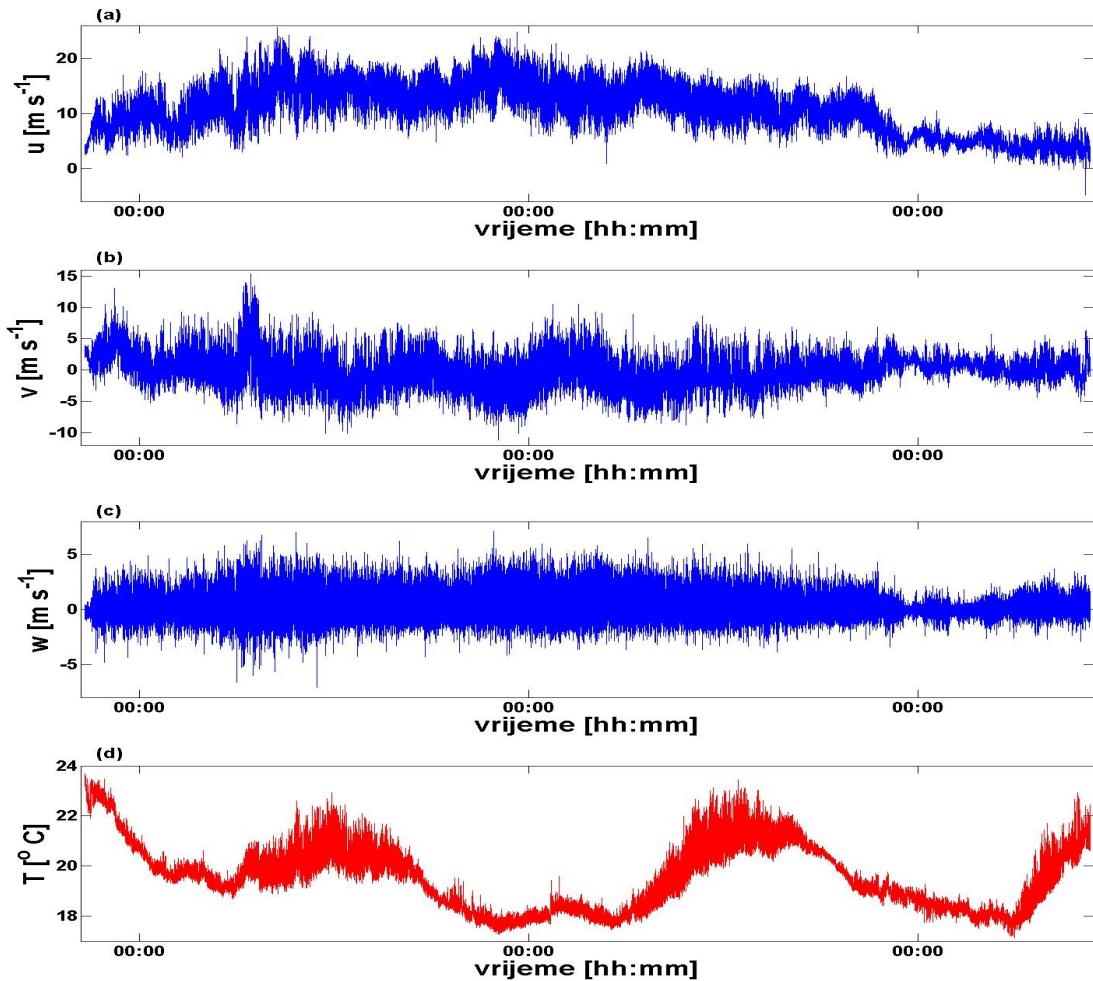
## 5. REZULTATI I DISKUSIJA

Za prikaz izvornih podataka i rezultata, od ukupno 19, izdvojene su dvije bure (BURA\_18<sup>9</sup> i BURA\_19). Odabrane su s ciljem da se pokaže ona koja je po srednjoj horizontalnoj brzini najslabija (BURA\_18) i ona koja je najjača (BURA\_19). Pri tome se BURA\_18 može promatrati i kao predstavnica kraćih bura (trajanja kraćeg od 24 sata), a BURA\_19 kao predstavnica duljih bura (trajanja dužeg od 24 sata). Na slikama 7 i 8 redom su za BURU\_18 i BURU\_19 prikazani izvorni podaci s visine 40 m. Iz ovih slika odmah je uočljivo da je kraća BURA\_18 u prosjeku slabija od dulje BURE\_19, što se, na temelju tablice 2 i slike 9, potvrđuje kao općenito pravilo za ovaj skup podataka o ljetnim burama na srednjem Jadranu: dulja bura je, gledajući srednje horizontalne brzine i pripadne standardne devijacije (kao predstavnike fluktuacija oko srednjaka), ujedno i jača.



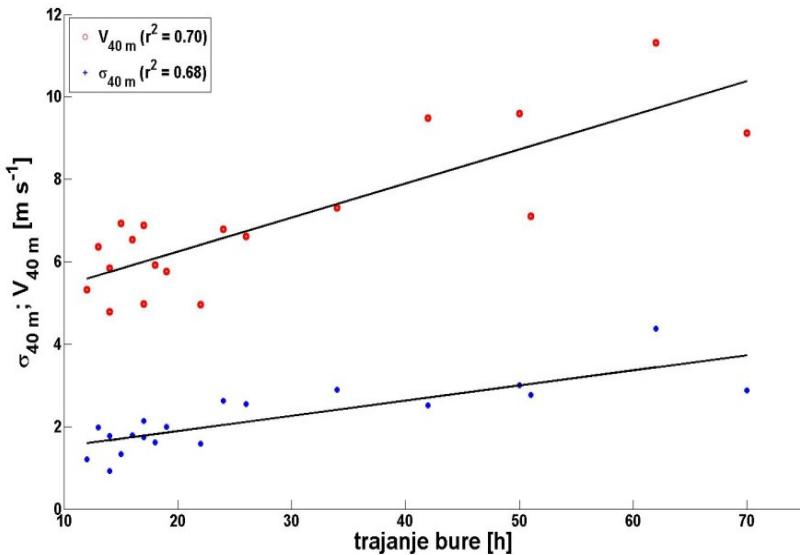
**Slika 7.** Prikaz sve tri komponente brzine vjetra, (a)  $u$ , (b)  $v$  i (c)  $w$  i (d) temperature zraka,  $T$  u ovisnosti o trajanju za BURU\_18 na visini 40 m. Na x-osi označeno je doba dana. Prikazana bura traje 14 sati (od 19. 7. 2011. u 18:41 do 20. 7. 2011. u 08:41).

<sup>9</sup> Brojevi od 1 do 19 označavaju kronološki redni broj od ukupno 19 analiziranih slučajeva ljetne bure na Pomenenom brdu



**Slika 8.** Prikaz sve tri komponente brzine vjetra, (a)  $u$ , (b)  $v$  i (c)  $w$  i (d) temperature zraka,  $T$  u ovisnosti o trajanju za BURU\_19 na visini 40 m. Na x-osi označeno je doba dana. Prikazana bura traje 62 sata (od 24. 7. 2011. u 20:37 do 27. 7. 2011. u 10:37).

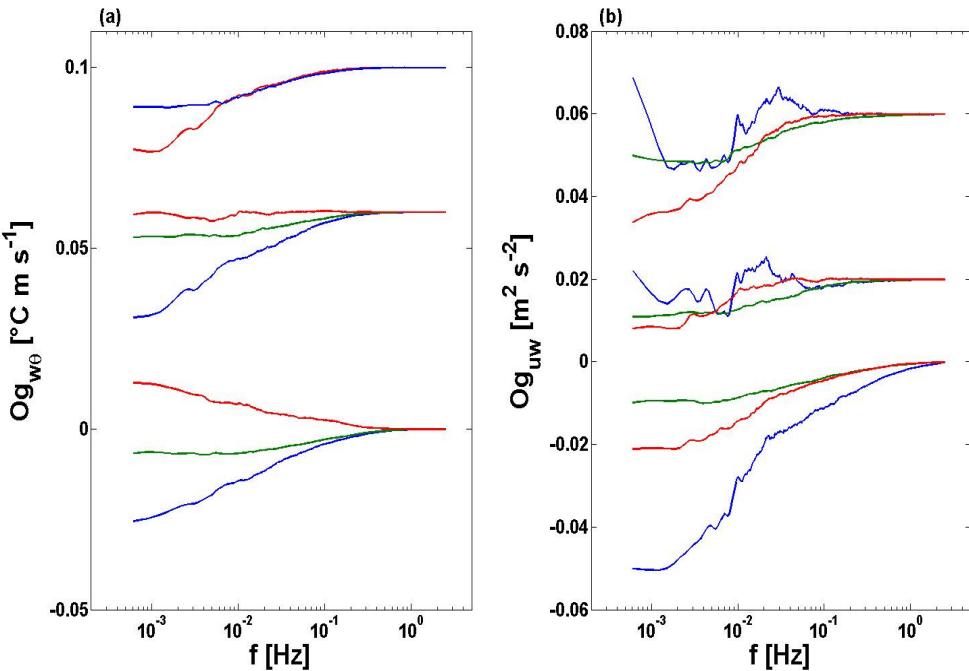
Vrijednosti izmjerene na 40 m (prikazane na slikama 7 i 8) razlikuju se od vrijednosti izmjerenih na ostalim visinama. To je vidljivo npr. usporedbom srednjih vrijednosti horizontalnih brzina za pojedine bure na pojedinim visinama (tablica 2); vrijednost srednje horizontalne brzine povećava se s porastom visine na kojoj su vršena mjerena. Ovakvo jako vertikalno smicanje vjetra posljedica je utjecaja orografije tj. trenja s tlom na nižim visinama. Nadalje, ovisnost temperature o vremenu može poslužiti kao pokazatelj pouzdanosti mjerjenja jer je na slici 7 i slici 8 uočljiv dnevni hod temperature.



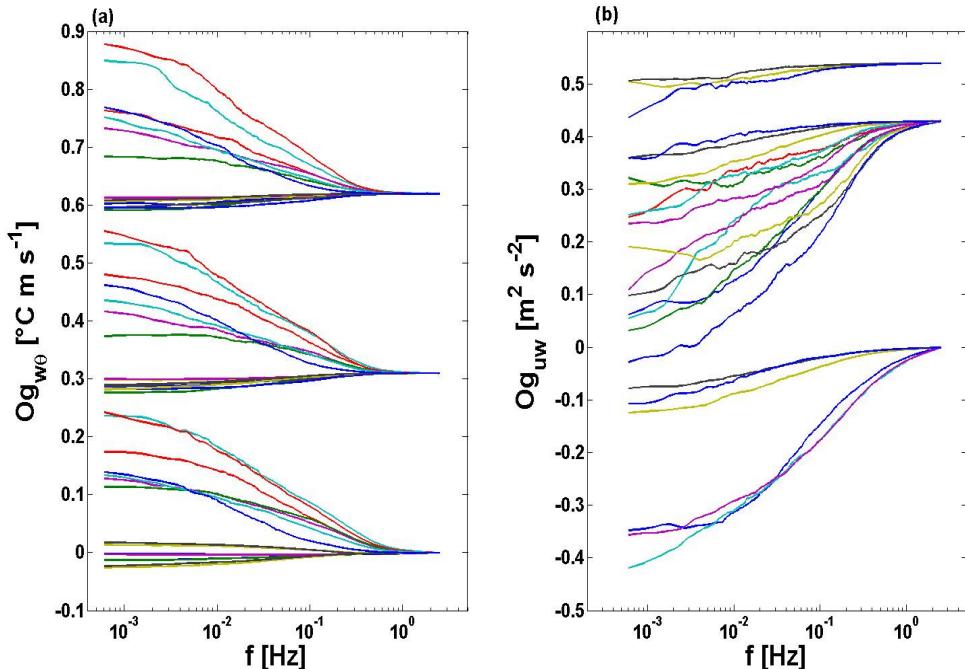
**Slika 9.** Ovisnost srednje horizontalne brzine bure (crveni kružići) i pripadajućih standardnih devijacija (plave točkice) o trajanju bure na visini 40 m. Pravci označavaju linearnu prilagodbu na pojedini skup podataka, a uspješnost prilagodbi ocjenjena je kvadratom koeficijenta korelacijske,  $r^2$ .

Za proračun ogiva, svaka bura je podjeljena na 4-satne blokove na kojima su one računate. Uz 50 % preklapanja, broj 1-h prozora za proračun kospektara na pojedinom 4-h bloku je 7. Na slikama 10 i 11 redom su za BURU\_18 i BURU\_19 prikazane absolutne (ne normirane) ogive kospektara vertikalnog toplinskog toka i toka impulsa u ovisnosti o frekvenciji. Postoji nejednak broj ogiva po visini za pojedinu buru što je najbolje uočljivo na slici 10b gdje na 20 m visine postoji 14 ogiva, a na 40 m svega 3. To je posljedica nedostatka podataka u mjerenu. Naime, za podatak koji nedostaje Matlab uzima vrijednost NaN (*eng. Not a Number*) i ako se samo jedna takva vrijednost pojavi u računanju kospektra, cijeli kospektar (10), a time i ogiva (11), postaju NaN. Pojedine krivulje na slikama 10 i 11 (kasnije i na slici 12) označavaju ogivu za određeni 4-h blok određenog događaja bure. Radi preglednosti prikazane su različitim bojama, ali nije naznačeno koja ogiva pripada kojem 4-h bloku u kronološkom smislu. Naime, budući da se period osrednjavanja određenog događaja bure izračunava kao srednja vrijednost perioda dobivenih na temelju pripadnih ogiva (vidi daljnji tekst i tablicu 2), pri vizualnoj analizi nije bitna absolutna vrijednost pojedinih ogiva već njihov skupni oblik i ponašanje (u smislu konvergencije; vidi poglavljje 2.2).

Prema Oncley i sur. (1996), period osrednjavanja često je moguće odrediti vizualno iz ogiva tako da se odredi frekvencija nakon koje većina ogiva počinje konvergirati. To je vrlo subjektivan pristup, a iz slika 10 i 11 jasno je da takvo nešto za buru nije trivijalno, pogotovo za turbulentni tok impulsa. Stoga su ovdje korištene normirane ogive koje, uz primjenu kriterija (13), omogućavaju objektivniji pristup.

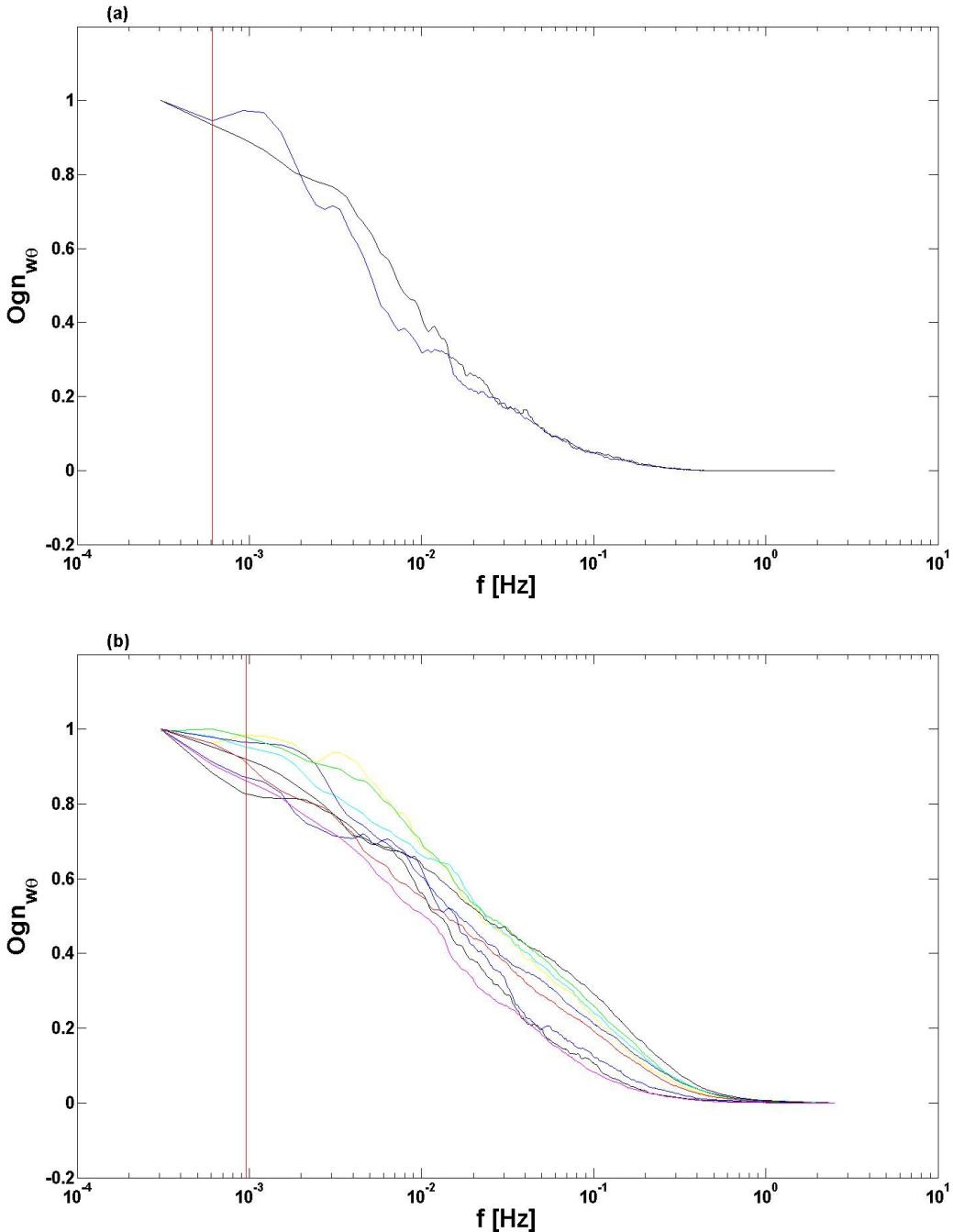


**Slika 10.** Ovisnost absolutne ogive kosppektra vertikalnog toplinskog toka (a), i absolutne ogive kosppektra vertikalnog toka impulsa (b) o frekvenciji izračunate za BURU\_18 na visinama 10 m, 20 m i 40 m. Svaka boja predstavlja ogivu jednog 4-satnog bloka bure (BURU\_18 traje 14 sati, dakle ima tri 4-satna bloka). Nedostatak ogive na 40 m kosppektra vertikalnog toplinskog toka posljedica je nedostatka podatka u mjerenu. Ogive kosppektra vertikalnog toplinskog toka za 20 m i 40 m podignute su za  $0.06$  i  $0.10 \text{ } ^\circ\text{C m s}^{-1}$ . Ogive kosppekstra vertikalnog toka impulsa za 20 m i 40 m podignute su za  $0.02$  i  $0.06 \text{ m}^2 \text{s}^{-2}$ .



**Slika 11.** Ovisnost absolutne ogive kosppektra vertikalnog toplinskog toka (a), i absolutne ogive kosppekstra vertikalnog toka impulsa (b) o frekvenciji izračunate za BURU\_19 na visinama 10 m, 20 m, 40 m. Svaka ogiva jednog 4-satnog bloka bure predstavljena je linijom određene boje (BURU\_19 traje 62 sata, dakle ima petnaest 4-satnih blokova). Zbog ograničenog broja boja u Matlabu neke se boje ponavljaju. Nedostatak podataka u mjerenu uzrok je nedostatka ogive na pojedinim nivoima. Ogive kosppektra vertikalnog toplinskog toka za 20 m i 40 m podignute su za  $0.31$  i  $0.62 \text{ } ^\circ\text{C m s}^{-1}$ . Ogive kosppekstra vertikalnog toka impulsa za 20 m i 40 m podignute su za  $0.43$  i  $0.52 \text{ m}^2 \text{s}^{-2}$ .

Budući da se ogive kospektra vertikalnog toka topline (slike 10a i 11a) pravilnije ponašaju (izraženije konvergiraju) od ogiva kospektra turbulentnog toka impulsa (slike 10b i 11b), normirane su samo ogive kospektra vertikalnog toplinskog toka (slika 12) koje se dalje koriste za procjenu perioda osrednjavanja. Vrijednosti srednjih perioda osrednjavanja,  $T_{aver}$ , i pripadajuće standardne devijacije za svih 19 izdvojenih bura i sve tri visine prikazane su u tablici 2.

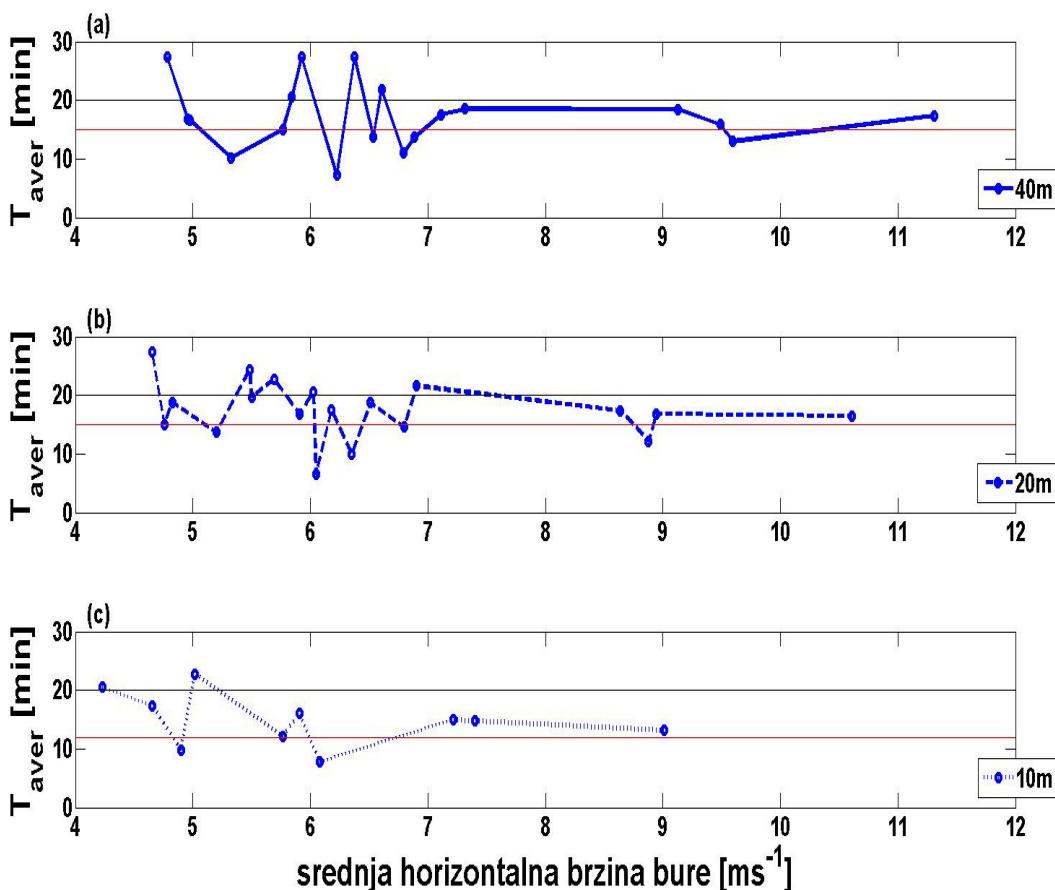


**Slika 12.** Prikaz ovisnosti normiranih ogiva kospektra toplinskog toka o frekvenciji za BURU\_18 (a) i BURU\_19 (b) na visini 40 m. Crvena vertikalna linija predstavlja srednju vrijednost perioda osrednjavanja za pojedinu buru izračunatu metodom normiranih ogiva (tablica 2). Svaka linija predstavlja ogivu jednog 4-satnog bloka bure (BURU\_19 traje 62 sata, a BURA\_18 14 sati pa stoga bura 19 ima više ogiva). Nepotpuni broj ogiva posljedica je nedostatka podatka u mjerenu.

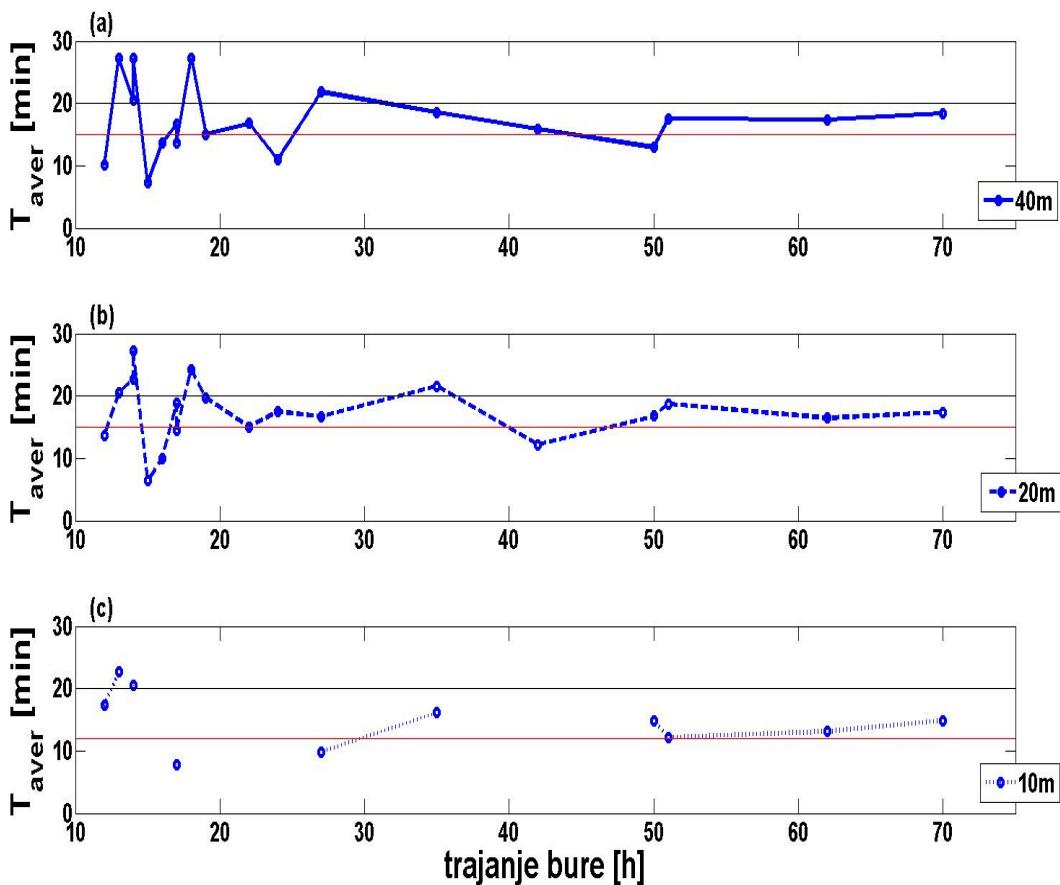
Ovisnost o događaju bure vizualno je prikazana na dva načina: ovisnost o srednjoj horizontalnoj brzini (slika 13) i o trajanju bure (slika 14). Vidljivo je kako srednji period osrednjavanja turbulentnog gibanja izrazito varira kod sporijih i kraćih bura, dok za bure sa srednjom horizontalnom brzinom većom od  $\approx 7 \text{ m s}^{-1}$  koje traju više od  $\approx 40 \text{ h}$ , srednji period osrednjavanja pokazuje sklonost konvergiranja periodima između 12 i 20 minuta (npr. Magjarević i sur., 2011).

Ne postoji općenito pravilo ovisnosti skale turbulentnog gibanja o visini nad tlom. Izraženje razlike po visini pokazuju kraće i slabije bure (tablica 2), ali i kod većine njih su međusobne razlike između pojedinih visina unutar 5 min.

Standardne devijacije perioda osrednjavanja kod pojedinih bura na pojedinim visinama prelaze i 60 %, što stavlja u pitanje pouzdanost primjene metode ogiva na ovaj skup podataka. Međutim, velike standardne devijacije su očekivane, pogotovo za bure dulje od 12 h. Naime, turbulentni tok topline izrazito mijenja karakteristike tijekom dana, što utječe na skalu konvergencije pojedine ogive (slika 10a i 11a), pa onda i na izbor skale turbulentnog gibanja.



**Slika 13.** Period osrednjavanja na visini 40 m, 20 m i 10 m u ovisnosti o srednjoj horizontalnoj brzini vjetra za svaku od 19 izdvojenih epizoda bure. Crna horizontalna linija označava vrijednost perioda osrednjavanja od 20 minuta. Crvena horizontalna linija na (a) i (b) označava vrijednost perioda osrednjavanja od 15 min, a na (c) vrijednost perioda osrednjavanja od 12 min.



**Slika 14.** Period osrednjavanja na visini 40 m, 20 m i 10 m u ovisnosti o trajanju za svaku od 19 izdvojenih epizoda bure. Crna horizontalna linija označava vrijednost perioda osrednjavanja od 20 min. Crvena horizontalna linija na (a) i (b) označava vrijednost perioda osrednjavanja od 15 min, a na (c) vrijednost perioda osrednjavanja od 12 min.

Na temelju ovih rezultata, može se zaključiti da srednje vrijednosti perioda osrednjavanja ukazuju na činjenicu da ne postoji jedinstvena skala turbulentnog gibanja za ljetnu buru na srednjem Jadranu; ona pokazuje ovisnost o svakom pojedinom događaju bure i o visini nad tlom. Ova analiza pokazuje da bi korištenje jedinstvenog intervala osrednjavanja (koji je čest u praksi) za turbulentciju bure na ovoj lokaciji bilo neopravdano. Ipak, ako se mora odabrati jedna vrijednost za period osrednjavanja, onda bi to za slučaj ljetne bure na srednjem Jadranu bio period od približno  $(17 \pm 3)$  minute, odabran na osnovi tablice 2 i slike 13 i 14 (npr. Magjarević i sur., 2011).

## 6. ZAKLJUČAK

Zbog vrlo učestalog pojavljivanja na nekim lokacijama i utjecaja na mnoge ljudske djelatnosti proučavanje karakteristika bure odavno je prisutno, osobito na sjevernom Jadranu. Zahvaljujući sve većem korištenju alternativnih izvora energije, karakteristike bure srednjeg i južnog Jadrana postaju sve važnije. Jedna od najbitnijih karakteristika bure je njena turbulencija. Za izračun turbulentnih parametara (TKE, disipacije TKE,...) potrebno je iz visokofrekventnih mjerena odrediti karakterističnu skalu turbulentnog gibanja tj. period osrednjavanja za turbulenciju. U ovom radu napravljena je procjena perioda osrednjavanja za ljetnu buru srednjeg Jadrana na temelju mjerena izvršenih anemometrima postavljenih na meteorološki toranj na Pometenom brdu (u blizini Dugopolja, zaleđe Splita) na tri visine (10 m, 20 m i 40 m) u razdoblju od 30. travnja 2010. godine do 29. srpnja 2010. godine.

Iz dobivenih mjerena, koristeći kriterije za smjer, brzinu i trajanje vjetra, izdvojeno je 19 epizoda bure. Uz pretpostavku mogućnosti Reynoldsovog osrednjavanja, napravljen je proračun spektra snage sve tri komponente brzine vjetra svih 19 bura, no nije uočen značajan minimum, pa je procjena perioda osrednjavanja napravljena pomoću metode normiranih ogiva (11) uz uvjet (13).

Dobiveni rezultati ukazuju na mogućnost da period osrednjavanja za turbulenciju ljetne bure na srednjem Jadranu nije jedinstven. On ovisi o brzini vjetra, trajanju bure i visini nad tlom. Za sporiju i kraću buru taj period izrazito varira. Uzrok tome mogla bi biti značajna tranzientnost (vrsta nestacionarnosti) takvih bura, jer za nestacionarne vremenske nizove uvjeti za Reynoldsovo osrednjavanje nisu u potpunosti ispunjeni (npr. Stull, 1988). S druge strane, za veće brzine i dulje bure (što garantira veću statističku stacionarnost) interval osrednjavanja pokazuje sklonost konvergiranja određenoj vrijednosti. Postoje indikacije da se vrijednost prema kojoj konvergiraju periodi osrednjavanja jačih i duljih bura nalazi negdje između 15 i 20 minuta, što je znatno drugačije od perioda od 1 minute određenog za buru u Senju (npr. Belušić i sur., 2006; Večenaj i sur., 2010). Uzrok tome moglo bi biti nepostojanje pulsacija na Pometenom brdu (nije uočen lokalni minimum u spektrima), koje su u Senju jasno ukazale na granicu između turbulentne skale i mezoskale. Što se tiče ovisnosti o visini nad tlom, izraženije razlike pokazuju slabije i kraće bure. Te se razlike između pojedinih visina, kod većine njih, nalaze unutar intervala od 5 min.

Velike standardne devijacije perioda osrednjavanja stavljuju u pitanje pouzdanost primjene odabrane metode na buru srednjeg Jadrana. To će se u nekom sljedećem radu morati

provjeravati primjenom drugih metoda za određivanje karakteristične vremenske skale turbulentnog gibanja.

Budući da je ovo jedna od prvih analiza za skup podataka, koji je zbog velike učestalosti uzorkovanja i broja nivoa na kojima je izvršeno mjerenje za sada jedinstven, dodatni proračuni sa istim, ali i dopunjениm podacima su nužni. No, unatoč tome, vjerujem da će rezultati analiza prikazani ovim radom pojačati interes za, do sada, nedovoljno istražene karakteristike mikroskale bure srednjag Jadrana.

## POPIS LITERATURE

- Bajić, A., 1988.: The strongest bora event during ALPEX SOP. *Rasprave-Papers* **23**, 1-9.
- Bajić, A., 1989.: Severe bora on the northern Adriatic. Part I: Statistical analysis. *Rasprave-Papers* **24**, 1-9.
- Bajić, A., 1991.: Application of the two-layer hydraulic theory on the severe northern Adriatic bora. *Meteorologische Rundschau* **44**, 129-133.
- Bajić, A. 2011.: Prostorna raspodjela očekivanih maksimalnih brzina vjetra na složenom terenu Hrvatske kao podloga za ocjenu opterećenja vjetrom. *Doktorski rad*, Geofizički odsjek PMF-a, 110 str.
- Bašić, T., 2010.: Utjecaj orografske reljefne strukture na buru na području zračne luke Dubrovnik simuliran wrf-arw modelom. *Diplomski rad*, Geofizički odsjek PMF-a, 111 str.
- Belušić, D. i Klaić, Z. B., 2004.: Estimation of bora wind gusts using a limited area model. *Tellus* **56A**, 296–307.
- Belušić, D. i Klaić, Z. B., 2006.: Mesoscale dynamics, structure and predictability of a severe Adriatic bora case. *Meteorol. Z.* **15**, 157–168.
- 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. i Grisogono, B., 2007.: Numerical simulation of pulsations in the bora wind. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* **133**, 1371–1388.
- Bencetić Klaić, Z., Belušić, D., Grubišić, V., Gabela, L. i Ćoso, L., 2003.: Mesoscale airflow structure over the northern Croatian coast during MAP IOP 15 – a major bora event. *Geofizika* **20**, 23-61.
- 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.
- Enger, L. i Grisogono, B., 1998.: The response of bora-type flow to sea surface temperature. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* **124**, 1227–1244.
- Frisch, U., 1995.: Turbulence; the legacy of A. N. Kolmogorov. *Cambridge University Press*, New York, USA, 296 str.
- 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. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* **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. Predavanja iz dijela Dinamičke meteorologije II, III (Interne skripte verzija od lipnja 2009.) 138 str.
- Grubišić, V., 2004.: Bora-driven potential vorticity banners over the Adriatic. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* **130**, 2571–2603.
- Heimann, D., 2001.: A model-based wind climatology of the eastern Adriatic coast. *Meteorol. Z.* **10**, 5–16.
- Holton, J.R., 2004.: *An Introduction to Dynamic Meteorology*. Academic Press, 4th edition, San Diego, USA, 511 str.
- Horvath, K., Fita, L., Romero, R. i Ivančan-Picek, B., 2006.: A numerical study of the first phase of a deep Mediterranean cyclone: cyclogenesis in the lee of the Atlas Mountains. *Meteorol. Z.* **15**, 133- 146.
- Horvath, K., Iivatek-Šahdan, S., Ivančan-Picek, B., i Grubišić, V., 2009.: Evolution and structure of two severe cyclonic Bora events: Contrast between the northern and southern Adriatic. *Weather Forecast*. **24**, 946-964.
- Horvath, K., Lin, Y.-L. i Ivančan-Picek, B., 2008.: Classification of cyclone tracks over Apennines and the Adriatic sea. *Mon. Wea. Rev.* **136**, 2210–2227.
- Ivančan-Picek, B. i Tutiš, V., 1996.: A case study of a severe Adriatic bora on 28 December 1992. *Tellus* **48A**, 357–367.
- Jeromel, M., Malačić, V. i Rakovec, J., 2009.: Weibull distribution of Bora and sirocco winds in the northern Adriatic Sea. *Geofizika* **26**, 85-100.
- Jurčec, V., 1981.: On mesoscale characteristics of bora conditions in Yugoslavia. *Pure Appl. Geophys.* **119**, 640–657.
- Klemp, J. B. i Durran, D. R., 1987.: Numerical modelling of Bora winds. *Meteorol. Atmos. Phys.* **36**, 215–227.
- Kuettner, J. i O'Neill, T.H.R., 1981.: ALPEX. The GARP mountain subprogram. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **67**, 793-805.
- 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., Večenaj, Ž., Horvath, K. i Grisogono, B., 2011.: Turbulence averaging interval for summer bora flows at the middle of the NE Adriatic coast. *31st International Conference on Alpine Meteorology*. Aviemore, Škotska, 23-27.05. 2011.

- Mahrt, L., Gamage, N., 1987.: Observations of turbulence in stratified flow. *J. Atmos. Sci.* **44**, 1106-1121.
- Makjanić, B., 1978.: Bura, jugo, etezija. *Prilozi poznavanju vremena i klime SFRJ*, sv. **5**, 1-43.
- Metzger, M. i Holmes, H. 2008.: Time scales in the unstable atmospheric surface layer, *Boundary-Layer Meteorol.* **126**, 29-50.
- Moncrieff, J., Clement R., Finnigan J., Meyers T., 2004.: Averaging, detrending, and filtering of eddy covariance time series. Iz knjige: Lee X., Massman W., Law B.: *Handbook of micrometeorology*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, str. 7–31.
- 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.
- Pandžić, K., 1979.: Uzroci nastanka i svojstva bure. *Diplomski rad*, Geofizički odsjek PMF-a, 58 str.
- Poje, D., 1992.: Wind persistence in Croatia. *Int. J. Clim.* **12**, 569–586.
- Press, W.H., Flannery, B.P., Teukolsky, S.A. i Vetterling, W.T., 1989: *Numerical recipes: The art of scientific computing (FORTRAN version)*. Cambridge University Press, New York, 702 str.
- Smith, R. B., 1987.: Aerial observations 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.
- Telišman Prtenjak, M. i Belušić, D., 2009.: Formation of reversed lee flow over the north-eastern Adriatic during Bora. *Geofizika* **26**, 145-155.
- Tennekes, H., Lumely, J., 1972.: *A First Course in Turbulence*. MIT Press, Cambridge, 300 str.
- Tutiš, V., 1988.: Bora on the Adriatic coast during ALPEX SOP on 27-30 April 1982. *Rasprave-Papers*, **23**, 45-56.
- 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., Belušić, D., Grubišić, V. i Grisogono, B., 2011a.: Along-coast features of the bora related turbulence. *Boundary-Layer Meteorol.* u recenziji.

- Večenaj, Ž., De Wekker, S.F.J., Grubišić, V., 2011b.: Near surface characteristics of the turbulence structure during a mountain wave event. *J. Appl. Meteor. Climat.* **50**, 1088-1106.
- Vickers, D. i Mahrt, L., 1997.: Quality control and flux sampling problems for tower and aircraft data. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **14**, 512–526.
- Vučetić V., 1991.: Statistical analysis of severe Adriatic bora. *Cro. Met. J.* **26**, 41-51.
- Yoshino, M. M., 1976.: Local Wind Bora. *University of Tokyo Press*, Tokyo , 289 str.