

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

DIPLOMSKI RAD

TESTIRANJE TEORIJE SLIČNOSTI NA LJETNOJ BURI
SREDNJEG JADRANA

IGOR LISAC

Voditelj: Prof. dr. sc. Branko Grisogono

Suvoditelj: Dr. sc. Željko Večenaj

Zagreb, 2014.

Sadržaj

1. Uvod

2. Teorijski pregled

- 2.1. Reynoldsovo osrednjavanje
- 2.2. Teorija sličnosti i Buckinghamov Pi-teorem
- 2.3. Obukhova duljina i MOTS
- 2.4. Funkcije teorije sličnosti
 - 2.4.1. Monin-Obukhove univerzalne funkcije
 - 2.4.2. Standardne devijacije

3. Lokacija i baza podataka

4. Rezultati i diskusija

- 4.1. Parametar stabilnosti za buru srednjeg Jadrana
- 4.2. Testiranje Monin-Obukhovih funkcija sličnosti
- 4.3. Standardne devijacije
 - 4.3.1. Standardne devijacije brzine vjetra
 - 4.3.2. Standardna devijacija temperature

5. Zaključak

6. Literatura

1. Uvod

Bura je mahovit sjeveroistočni silazni vjetar koji se često javlja duž istočne obale Jadranskog mora na zavjetrinskoj strani Dinarida. Ona znatno utječe na dinamiku struja u Jadranskom moru, otežava odvijanje prometa (avionskog, cestovnog i pomorskog) te ima vrlo nepovoljan utjecaj na poljoprivredu. Brzina puhanja je, između ostalog, uvjetovana i kompleksnom orografijom terena čija visina i širina rastu od sjeverozapada prema jugoistoku. Najjača bura javlja se na mjestima gdje je dominantan smjer puhanja vjetra okomit na visoki planinski lanac uz blage navjetrinske i vrlo strme zavjetrinske strane te niz planinske prolaze. Zbog tih je razloga najveća brzina izmjerena na području južnog Velebita (69 m s^{-1}) pa je i općenito bura sjevernog Jadrana više proučavana (npr. Belušić i Klaić 2006.; Večenaj i sur. 2010.) od bure srednjeg i južnog Jadrana (npr. Magjarević, 2011.; Babić, 2013.). Sinoptičke situacije prilikom bure (npr. Yoshino, 1976., Jurčec, 1981.) obično su povezane s jakim gradijentom tlaka između anticiklone nad srednjom i istočnom Europom i ciklone iznad središnjeg Mediterana (npr. Poje, 1992.). Hladan zrak sa sjeveroistoka dolazi do planine te se spušta po toplijoj zavjetrinskoj strani. Međutim, to spuštanje je prebrzo i preplitko da bi se zrak adijabatski stigao zagrijati pa je bura relativno hladan vjetar.

Mjerenja i numeričke simulacije pokazuju da je bura najjača u zimskom razdoblju zbog prolaska fronti sa sjeverozapada i ciklona koje se kreću prema jugoistoku (npr. Brzović, 1999.). Napredak u razumijevanju mehanizma nastanka bure hidrauličkim skokom opisao je Smith (1987.) pomoću mjerenja u sklopu ALPEX projekta (ALPine EXperiment) te teorijskim pristupom za jaki silazni vjetar (npr. Smith i Sun, 1987.). Teorija kaže da je lom valova glavni pokretački mehanizam nastanka jake bure (npr. Smith, 1987.; Gohm i sur., 2008.) pri prelasku fluida iz subkritičkog toka ispred planine u superkritički tok u zavjetrini planine, pri čemu može doći do hidrauličkog skoka (npr. Grisogono i Belušić, 2009.). Ovaj proces je primarno hidrostatičan.

Bura je vjetar koji se odvija na više prostorno-vremenskih skala. Kao što je već spomenuto, sinoptička skala je na temelju podataka statistički dobro proučena (vidi iznad). Mezoskalna struktura bure istraživana je i numeričkim modelima i oni je dobro opisuju (npr. Klemp i Durran, 1987.; Enger i Grisogono, 1998.; Klaić i sur., 2003.; Gohm i sur., 2008.). Međutim, numeričke simulacije imaju poteškoća kod reprodukcije mikroskalnih karakteristika bure

zbog osjetljivosti modela na različite parametrizacije turbulencije (npr. Belušić i Klaić, 2006.; Gohm i sur., 2008.). Za evaluaciju i eventualna poboljšanja parametrizacija potrebna su istraživanja mikroskalnih karakteristika bure, a to zahtijeva mjerjenja visoke rezolucije u prostoru i/ili vremenu. Postoji mnogo studija koje se dotiču parametrizacije turbulencije kod bure (npr. Jeričević i Grisogono, 2006.; Mauritsen i sur., 2007.; Večenaj i sur., 2012.). Svaki od tih radova ukazuje na bit turbulentne kinetičke energije (TKE) i turbulentnih tokova za uspješnu parametrizaciju turbulencije. Treba napomenuti da je struktura turbulencije iznad ravnog homogenog terena intenzivno proučavana i mjernjima i modelima (npr. Oncley i sur., 1996.; Piper i Lundquist, 2004.), ali iznad kompleksnih konfiguracija terena dolazi do problema u izvedbi mjerjenja pa je potreba za takvim istraživanjima sveopće prisutna.

Turbulencija se iz podataka određuje statističkim pristupom. U svrhu toga potrebno je odrediti odgovarajući period T_{sr} za odvajanje procesa turbulentne skale od onih mezoskale. Odabirom perioda T_{sr} uključujemo skale od one koju instrument može „uloviti“ do skale definirane periodom T_{sr} . Stoga ako uzmemmo premali period T_{sr} postoji mogućnost da isključimo neke turbulentne tokove koji spadaju u mikroskalu. Ako pak uzmemmo preveliki period T_{sr} , možemo uključiti neke mezoskalne procese. Pri slaboj turbulenciji i stabilnoj stratifikaciji dovoljno je uključiti samo mali dio mezoskalnih tokova da se drastično promijeni vrijednost turbulentnih tokova pa čak i njihov predznak (npr. Howell i Sun, 1999.; Vickers i Mahrt, 2003). Nadalje, turbulentni tokovi vezani su uz lokalno smicanje vjetra i stratifikaciju temperature npr. putem teorije sličnosti, a mezoskalni tokovi nisu. Krivom procijenom perioda T_{sr} možemo pogoršati relacije uspostavljene putem teorije sličnosti (npr. Smedman, 1988.).

Fundamentalni rad o univerzalnoj skali duljine za procese u horizontalnom površinskom sloju (Obukhov, 1946.) bio je osnova za izvod Monin-Obukhove teorije sličnosti (MOTS) (Monin i Obukhov, 1954.). Uz njihov rad na teoriji sličnosti, na začetak moderne mikrometeorologije direktno je utjecalo provođenje nekoliko važnih eksperimenata kao što su KANSAS 1968 (npr. Izumi, 1971.) i International Turbulence Comparison Experiment (ITCE 1976) (npr. Dyer i Bradley, 1982.) te razvoj novih naprava za mjerjenje (npr. Bovscheverov i Voronov, 1960.; Hanafusa i sur., 1982.). Metoda direktnog mjerjenja turbulentnih tokova (*eng. eddy covariance method*) koja je razvijena ranije (npr. Montgomery, 1948.) potpuno se ustalila izumom ultrasoničnih anemometara. Jedan od bitnijih projekata, KANSAS 1968 poslužio je kao osnova za razvoj univerzalnih funkcija Businger i sur. (1971.). Nakon loših kritika na eksperimentalni dizajn KANSAS 1968 eksperimenta provedeno je nekoliko kasnijih

mikrometeoroloških eksperimenata kao što je švedski eksperiment kod sela Lövst (npr. Högström, 1990.). Högström je predložio ispravljene univerzalne funkcije koje koristimo i danas (npr. Högström, 1988.). Detaljan povijesni pregled eksperimenata i pronalazaka može se naći u radu Fokena (2006.).

MOTS je, strogo govoreći, valjana za proučavanje turbulencije unutar horizontalnog površinskog sloja (*eng. constant-flux layer*) te su neki autori ukazali na potrebu za potpunijom teorijom (npr. McNaughton, 2006.). Uz istraživanja pri skoro idealnim uvjetima, proučavanje MOTS funkcija iznad kompleksne orografije također je prijeko potrebno. Istraživački projekti u drugoj polovici 20. stoljeća većinom su bili usmjereni na mezoskalne procese te manje na turbulentne karakteristike. U tu svrhu organizirani su istraživački projekti poput Mesoscale Alpine Programme (MAP) 1999. godine (npr. Bougeault i sur., 2001.).

Određivanje turbulencije temelji se uglavnom na računanju statističkih momenata prvog i drugog reda pojedinih varijabli, koji ulaze u određivanje funkcija sličnosti (npr. de Franceschi i Zardi, 2009.). Stoga je cilj ovog rada testiranje valjanosti Monin-Obukhovih univerzalnih funkcija za buru srednjeg Jadrana te proučavanje ponašanja varijanci u ovisnosti o vrsti stabilnosti nad pripadnim kompleksnim terenom.

2. Teorijski pregled

2.1. Reynoldsovo usrednjavanje

Za računanje turbulentnih veličina meteoroloških i drugih turbulentnih polja potrebno je prvo razdvojiti gibanja na velikim vremenskim skalama od onih na malim skalamama. Gibanja na makro- (sinoptičkim) skalamama i mezoskalna gibanja mogu jako precijeniti turbulenciju u atmosferskom graničnom sloju (AGS) te ih je potrebno što efikasnije ukloniti, pomoću adekvatnog perioda T_{sr} , pri promatranju turbulentnih veličina.

Teorija nalaže da bi u Fourierovim spektrima i kosepektrima snage trebalo postojati lokalni minimum koji odvaja mikroskalu od makro- i mezoskale (npr. Stull, 1988.). Pronalaženje točnog položaja minimuma u spektru jako je bitno jer pogrešno izračunata vrijednost minimuma može uvažiti procese koji nisu bitni za turbulenciju ili ne uzeti u obzir bitne procese. Kada odredimo točnu vremensku skalu (T_{sr}) moguće je primjeniti Reynoldsovu dekompoziciju. Tada se određeno meteorološko polje X može rastaviti na sporo varirajuću komponentu \bar{X} i brzo varirajuću komponentu X' odnosno perturbaciju tog polja koja je bitna za računanje turbulentnih parametara (npr. Stull, 1988.):

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

Prema definiciji Reynoldsovi srednjaci ($\bar{}$) perturbacija iščezavaju ($\bar{X}'=0$) kao i srednjaci umnoška nekih dviju perturbiranih i srednjih veličina (npr. $\bar{X}'\bar{Y}$). Srednjaci umnoška dviju perturbiranih veličina (npr. $\bar{X}'\bar{Y}'$) ne mogu se zanemariti jer je moguće da poprime magnitude usporedive s ostalim članovima u promatranim jednadžbama (npr. Stull, 1988.).

Uvažavajući dane pretpostavke i Boussinesqovu aproksimaciju osnovne jednadžbe gibanja, adijabatička jednadžba termodinamike i jednadžba kontinuiteta dane su u obliku:

$$\frac{Du}{Dt} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + f v + F_{Rx} \quad (2)$$

$$\frac{Dv}{Dt} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} - f u + F_{Ry} \quad (3)$$

$$\frac{Dw}{Dt} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial z} + g \frac{\theta}{\theta_0} + F_{RZ} \quad (4)$$

$$\frac{D\theta}{Dt} = -w \frac{d\theta_0}{dz} \quad (5)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (6)$$

gdje su u, v, w komponente brzine vjetra u Kartezijevom koordinatnom sustavu, ρ_0 srednja gustoća česti zraka, g ubrzanje sile teže, p tlak zraka, f Coriolisov parametar, θ potencijalna temperatura i F_{Rx}, F_{Ry}, F_{RZ} komponente trenja. Nakon Reynoldsove dekompozicije, te jednadžbe poprimaju sljedeći izgled (npr. Babić, 2013.):

$$\frac{\bar{D}\bar{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + f \bar{v} - \left[\frac{\partial \bar{u}' \bar{u}'}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}' \bar{v}'}{\partial y} + \frac{\partial \bar{u}' \bar{w}'}{\partial z} \right] + \bar{F}_{Rx} \quad (7)$$

$$\frac{\bar{D}\bar{v}}{Dt} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} - f \bar{u} - \left[\frac{\partial \bar{u}' \bar{v}'}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}' \bar{v}'}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}' \bar{w}'}{\partial z} \right] + \bar{F}_{Ry} \quad (8)$$

$$\frac{\bar{D}\bar{w}}{Dt} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + g \frac{\bar{\theta}}{\theta_0} - \left[\frac{\partial \bar{u}' \bar{w}'}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}' \bar{w}'}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}' \bar{w}'}{\partial z} \right] + \bar{F}_{Rx} \quad (9)$$

$$\frac{\bar{D}\bar{\theta}}{Dt} = -\bar{w} \frac{d\theta_0}{dz} - \left[\frac{\partial \bar{u}' \bar{\theta}'}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}' \bar{\theta}'}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}' \bar{\theta}'}{\partial z} \right] \quad (10)$$

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0 \quad (11)$$

U danim jednadžbama javljaju se ranije spomenuti srednjaci umnožaka različitih perturbiranih veličina odnosno turbulentni tokovi (kovarijance) te također i srednjaci umnožaka istih perturbiranih veličina (varijance). Tako npr. $\bar{w}'\bar{\theta}'$ predstavlja kinematički vertikalni turbulentni tok topline, $\bar{u}'\bar{w}'$ x -komponentu vertikalnog turbulentnog toka impulsa, \bar{u}'^2 varijancu x -komponente perturbacije brzine vjetra, itd...

2.2. Teorija sličnosti i Buckingham Pi-teorem

Fizika AGS-a je vrlo kompleksna, ali mjeranjima obavljenim u njemu dolazi se do zaključka da taj sloj pokazuje i neke karakteristike koje se često ponavljaju, odnosno da možemo dobiti

vezu između varijabli koje nas zanimaju. Teorija sličnosti nam daje način kako organizirati određene varijable u bezdimenzionalne grupe u svrhu proučavanja odnosa između grupa i mogućeg razvoja empirijskih formula koje povezuju određene grupe varijabli koje nas interesiraju.

Buckinghamova Pi teorija (npr. Stull, 1988.) nam služi za formiranje varijabli u bezdimenzionalne grupe i za dobivanje univerzalnih empirijskih relacija između tih grupa. Provodi se na sljedeći način:

- i) Izaberemo ili pogodimo *ključne* varijable koje su nam bitne za dani slučaj
- ii) Organiziramo varijable u bezdimenzionalne grupe (*Buckinghamove Pi grupe*) normiranjem tih varijabli s nekim *skalirajućim parametrima*
- iii) Pomoću obavljenih mjeranja odredimo vrijednosti pojedinih bezdimenzionalnih grupa
- iv) Na temelju izračunatih vrijednosti crtamo krivulje ovisnosti jedne promatrane grupe o drugoj te ako je moguće regresijom na dobivene podatke odredimo empirijsku jednadžbu (slobodne koeficijente prepostavljene jednadžbe) koja povezuje dvije grupe

Rezultat gore opisanog postupka su krivulje koje izgledaju slično, te otuda i naziv *teorija sličnosti*. Ako odaberemo više varijabli od potrebnog broja za neki slučaj, ostale bezdimenzionalne grupe neće ovisiti o grupi koja je višak. U slučaju odabira premalog broja varijabli podaci će pokazivati veliko raspršenje, ili ćemo za rezultat dobiti krivulje koje ne izgledaju slično.

Važno je napomenuti da je teorija sličnosti u biti tip zatvaranja sustava jednadžbi nultog reda (npr. Stull, 1988.). Dobivene relacije sličnosti često se koriste za računanje profila srednjaka varijabli ili pripadnih turbulentnih veličina u ovisnosti o visini i položaju. Vrijeme se rijetko koristi kao važna varijabla jer se može dobiti pomoću varijabli za duljinu i brzinu.

Unutar granica Buckinghamove Pi-teorije postoji mnoštvo parametara koji se mogu izabrati kao skalirajući parametri za neki slučaj. Istraživanjem se pokazalo da se neke varijable češće pojavljuju u sličnim klasama problema pri teoriji sličnosti te se zbog toga nazivaju skalirajuće varijable za taj problem.

2.3. Obukhova duljina i MOTS

Obukhova duljina (L) je karakteristična skala za debljinu takozvanog dinamičkog podsloja (npr. Obukhov, 1946.) odnosno sloja u kojem je utjecaj osnovne stratifikacije zanemariv (npr. Monin i Yaglom, 1973.). Ona je proporcionalna debljini AGS-a, ali nije joj jednaka. Noviji opis Obukhove duljine povezuje ju s dimenzionalnom analizom jednadžbe za TKE kao omjer učinka uzgona i smicanja (npr. Stull, 1988.).

Obukhov (1946.) je prepostavio da parametri $\frac{g}{T_0}$ (T_0 : temperatura na površini), $u_* = \sqrt{(\bar{u}'w')^2 + (\bar{v}'w')^2}^{\frac{1}{4}}$: brzina trenja i $\frac{q}{C_p \cdot \rho}$ (q : kinematički tok topline, C_p : specifična toplina, ρ : gustoća zraka) opisuju turbulentiju dinamičkog podsloja iznad sloja hrapavosti (*eng. roughness sublayer*). S tom prepostavkom, definirao je Obukhovu duljinu kao:

$$L = -\frac{\bar{T}_0 \cdot u_*^3}{k \cdot g \cdot \overline{(w'T')}} \quad (12)$$

gdje su \bar{T}_0 srednja temperatura, T' fluktuacija temperature, w' fluktuacija z -komponente brzine vjetra, $\overline{w'T'}$ vertikalni turbulentni tok topline i k von Kármánova konstanta.

Monin i Obukhov su izveli svoju poznatu teoriju sličnosti (npr. Monin i Obukhov, 1954.) koristeći Buckingham Pi-teorem (npr. Stull, 1988.) uz rezultate radova o logaritamskom profilu vjetra (npr. Prandtl, 1925.) i Obukhovoj duljini (npr. Obukhov, 1946.). Za bezdimenzionalnu grupu kod koje je gradijent vjetra ključna varijabla uzeli su $\left(\frac{k \cdot z}{u_*} \cdot \frac{\partial \bar{u}}{\partial z}\right)$, a za grupu koja se odnosi na gradijent temperature $\left(\frac{z}{T_*} \cdot \frac{\partial \bar{T}}{\partial z}\right)$, gdje je $T_* = -\frac{\overline{w'T'}}{u_*}$: dinamička temperatura. Navedene bezdimenzionalne grupe promatrane su u ovisnosti o bezdimenzionalnoj grupi $\left(\frac{z}{L}\right)$ koja se naziva *parametar stabilnosti*. Iz relacije (12) vidljivo je da za pozitivne vrijednosti vertikalnog turbulentnog toka topline (nestabilna stratifikacija) imamo negativne vrijednosti parametra stabilnosti, a za negativne vrijednosti vertikalnog turbulentnog toka topline (stabilna stratifikacija) imamo pozitivne vrijednosti parametra stabilnosti. Drugim riječima, promatramo ovisnost bezdimenzionalnih grupa o vrsti stabilnosti određenoj parametrom $\frac{z}{L}$:

$$\begin{cases} \frac{z}{L} < 0, \text{nestabilna stratifikacija} \\ \frac{z}{L} = 0, \text{neutralna stratifikacija} \\ \frac{z}{L} > 0, \text{stabilna stratifikacija.} \end{cases}$$

2.4. Funkcije teorije sličnosti

2.4.1. Monin-Obukhove univerzalne funkcije

Bezdimenzionalne grupe za gradijente brzine vjetra i temperature možemo napisati u obliku univerzalnih funkcija koje ovise o parametru stabilnosti $\frac{z}{L}$:

$$\varphi_m\left(\frac{z}{L}\right) = \frac{k \cdot z}{u_*} \cdot \frac{\partial \bar{u}}{\partial z}, \quad (13)$$

$$\varphi_H\left(\frac{z}{L}\right) = \frac{z}{T_*} \cdot \frac{\partial \bar{T}}{\partial z} \quad (14)$$

gdje su $\frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = \frac{\bar{u}_2 - \bar{u}_1}{\Delta z}$: gradijent iznosa brzine vjetra, \bar{u}_2 i \bar{u}_1 su srednje brzine vjetra na gornjem i donjem nivou, Δz je razlika u visini između gornjeg i donjeg nivoa, z visina na kojoj se računa gradijent brzine, $k = 0,4$ i $\frac{\partial \bar{T}}{\partial z} = \frac{\bar{T}_2 - \bar{T}_1}{\Delta z}$: gradijent temperature.

Nakon otkrića MOTS-a mnogo eksperimentalnog rada bilo je usmjereno prema pronalaženju univerzalnih funkcija (npr. Zilitinkevich i Tschalikov, 1968., Dyer i Hicks, 1970., Webb, 1970.). Najviše su se koristile univerzalne funkcije koje su predložili Businger i sur. (1971.) i temeljile su se na KANSAS 1968 eksperimentu te su imale drugačiji oblik za izmjenu momenta φ_m i topline φ_H . Odbačene su zbog nerealne vrijednosti dobivene za von Kármánovu konstantu (npr. Wieringa, 1980.). U ovisnosti o parametru stabilnosti $\frac{z}{L}$ funkcije Busingera i sur. (1971.) reformulirane su i predložene u drugom obliku te se uglavnom takve koriste i danas (npr. Högström, 1988.):

$$\varphi_m\left(\frac{z}{L}\right) = \left(1 - 19.3 \frac{z}{L}\right)^{-\frac{1}{4}} \quad -2 < \frac{z}{L} < 0 \quad (15a)$$

$$\varphi_m \left(\frac{z}{L} \right) = 1 + 6 \frac{z}{L} \quad 0 < \frac{z}{L} < 1 \quad (15b)$$

$$\varphi_H \left(\frac{z}{L} \right) = 0.95 \left(1 - 11.6 \frac{z}{L} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad -2 < \frac{z}{L} < 0 \quad (16a)$$

$$\varphi_H \left(\frac{z}{L} \right) = 0.95 + 7.8 \frac{z}{L} \quad 0 < \frac{z}{L} < 1 \quad (16b)$$

Dobivene univerzalne funkcije temelje se na $k = 0,4$.

2.4.2. Standardne devijacije

Za bolje razumijevanje turbulentnih karakteristika potrebno je računati i standardne devijacije brzine vjetra i temperature. U skladu s Buckinghamovim Pi-teoremom standardne devijacije brzine vjetra s_u, s_v, s_w skalirane su brzinom trenja u_* , a standardna devijacija temperature s_T dinamičkom temperaturom T_* (npr. de Francesci i sur., 2009.). Za ovisnost standardnih devijacija brzine vjetra s_i (gdje i predstavlja x, y, z komponente) o vrsti stabilnosti uzeta je funkcija:

$$\frac{s_i}{u_*} = a_i \left(1 + b_i \left| \frac{z}{L} \right| \right)^{\frac{1}{3}} \quad (17)$$

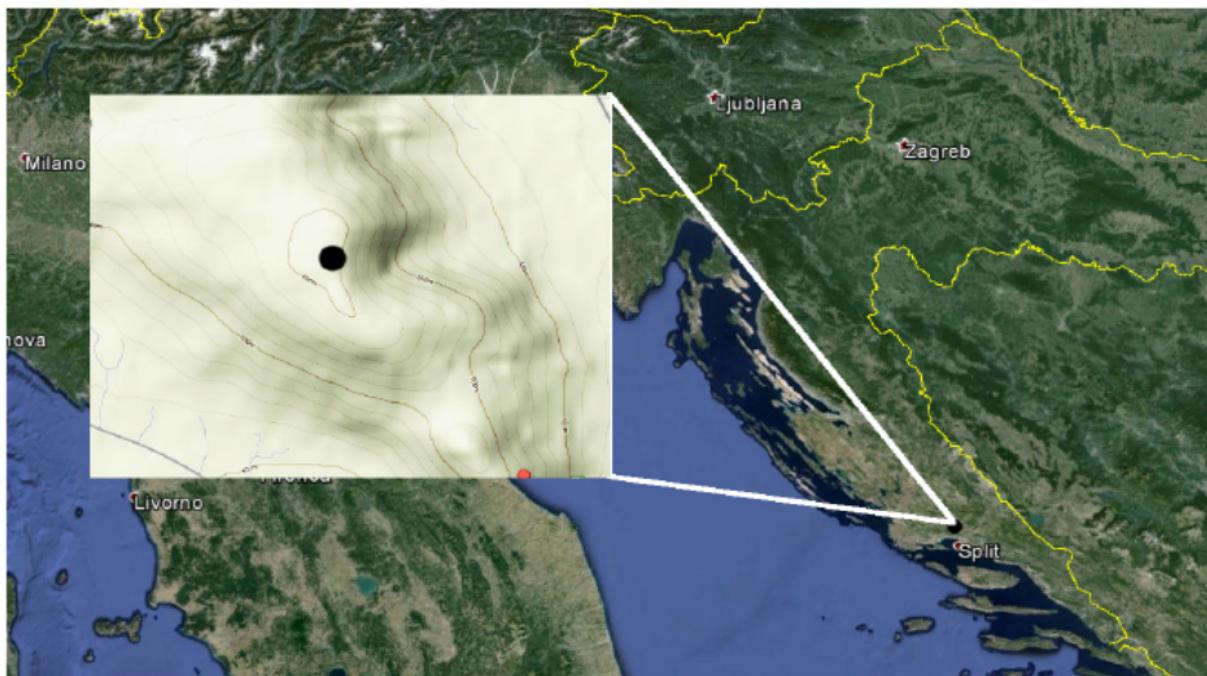
gdje su a_i i b_i slobodni koeficijenti koje je potrebno odrediti, dok je za standardnu devijaciju temperature u ovisnosti o vrsti stabilnosti uzeta funkcija:

$$\frac{s_T}{T_*} = \begin{cases} a_T \left(1 - b_T \frac{z}{L} \right)^{-\frac{1}{3}} & \frac{z}{L} \leq 0 \\ a_T \left(1 + b_T \frac{z}{L} \right)^{-1} & \frac{z}{L} \geq 0 \end{cases} \quad (18)$$

gdje su a_T i b_T slobodni koeficijenti.

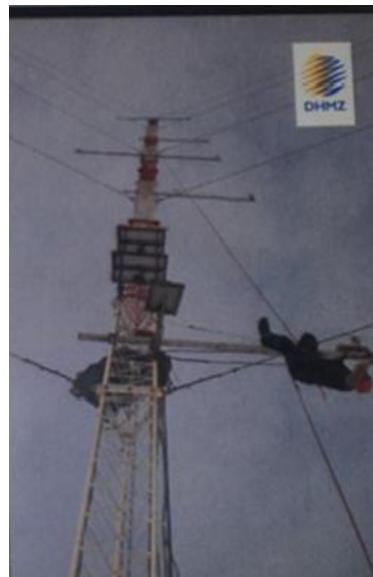
3. Podaci

U ovom radu koriste se podaci mjerjenja dobivenih s Pometenog brda ($43^{\circ} 36' N$, $16^{\circ} 28' E$) koje se nalazi blizu Dugopolja u zaleđu Splita. Položaj mjesta mjerjenja i okolna topografija prikazani su na Slici 1.



Slika 1. Satelitski prikaz šireg područja sjevernog Jadrana (izvor: Google Earth); uvećani prozor prikazuje topografiju i izohipse u okolini mjernog tornja (oko 600 m nadmorske visine). Crni kružić prikazuje točan položaj samog tornja (preuzeto iz Babić (2013.))

Anemometri su bili postavljeni na toranj visine 60 m na tri različite visine (10 m, 20 m i 40 m), svaki na krak duljine oko 2 m da bi se smanjio utjecaj tornja na mjerjenja (Slika 2.). Na izvornim podacima izmjerenum u razdoblju od 30. travnja do 29. srpnja 2010. Magjarević (2011.) je obavio kontrolu kvalitete podataka te je primijenio sljedeći kriterij za izdvajanje epizoda bure: iz vremenskih nizova podataka izdvojene su sve epizode vjetra koje traju minimalno 10 sati iz smjera u rasponu azimuta od 0 do 90° (sjeveroistočni vjetar), a srednja horizontalna brzina im je veća od $4,5 \text{ m s}^{-1}$. Tako izdvojene bure skraćene su na cijeli broj trajanja u satima zbog lakše obrade. Nakon toga se moglo pristupiti obradi podataka na izdvojenih 19 epizoda bure. (Tablica 1.- Preuzeto iz Magjarević, 2011.).



Slika 2. Mjerni toranj s tri ultrasonična anemometra „WindMaster Pro“ (Gill Instruments) postavljen na vrh Pometenog brda; mjerene su tri komponente brzine vjetra i sonična temperatura (frekvencija uzorkovanja od 5 Hz)

Tablica 1. Vrijednost srednje horizontalne brzine vjetra (V_{tot}) i period osrednjavanja (T_{sr}) svake izdvojene bure s pripadajućim standardnim devijacijama (σ). (Preuzeto iz Magarević, 2012.)

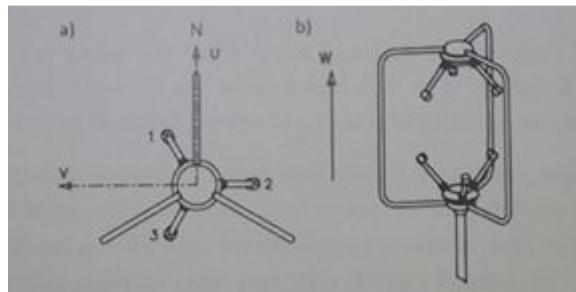
redni broj bure	period trajanja	trajanje bure [h]	srednja horizontalna brzina bure [$m s^{-1}$]						period osrednjavanja [min]					
			V_{tot}	σ	V_{tot}	σ	V_{tot}	σ	T_{sr}	σ	T_{sr}	σ	T_{sr}	σ
1	18.5. 21:43 - 19.5. 10:43	13	6,37	1,98	6,02	2,04	5,02	1,93	27,30	-	20,50	9,70	22,70	6,40
2	19.5. 19:53 - 21.5. 21:53	50	9,60	3,00	8,95	3,07	7,40	3,10	13,00	7,70	16,80	10,50	14,80	10,40
3	22.5. 09:08 - 23.5. 11:08	26	6,61	2,55	5,91	2,25	4,90	1,97	21,80	9,40	16,70	8,20	9,90	5,70
4	23.5. 20:43 - 24.5. 08:43	12	5,32	1,21	5,20	1,23	4,66	1,23	10,20	6,70	13,70	4,60	17,30	8,80
5	04.6. 21:36 - 06.6. 7:36	34	7,31	2,90	6,91	2,77	5,91	2,51	18,60	10,50	21,60	11,40	16,10	10,10
6	22.6. 16:56 - 25.6. 14:56	70	9,13	2,87	8,63	2,83	7,21	2,66	18,40	8,70	17,40	7,90	14,90	8,30
7	27.6. 09:16 - 29.6. 12:16	51	7,11	2,77	6,51	2,53	5,76	2,43	17,50	7,50	18,70	7,80	12,20	10,30
8	29.6. 20:06 - 30.6. 14:06	18	5,92	1,62	5,48	1,61	NaN	-	27,30	-	24,30	5,30	NaN	-
9	30.6. 15:02 - 01.7. 15:02	24	6,79	2,63	6,18	2,55	NaN	-	11,00	6,20	17,50	10,30	NaN	-
10	01.7. 19:17 - 02.7. 14:17	19	5,76	1,99	5,00	1,88	NaN	-	15,00	10,80	19,70	6,90	NaN	-
11	02.7. 18:52 - 03.7. 10:52	16	6,53	1,79	6,53	1,66	NaN	-	13,70	6,40	10,00	1,30	NaN	-
12	05.7. 15:02 - 06.7. 13:02	22	4,06	1,59	4,76	1,60	NaN	-	16,80	12,40	15,00	10,80	NaN	-
13	06.7. 18:52 - 08.7. 12:52	42	9,49	2,51	8,88	2,39	NaN	-	15,90	10,60	12,20	9,80	NaN	-
14	08.7. 22:12 - 09.7. 15:12	17	4,98	2,14	4,82	2,16	NaN	-	16,70	2,60	18,80	8,20	NaN	-
15	09.7. 23:47 - 10.7. 13:47	14	5,84	1,77	5,69	1,80	NaN	-	20,50	9,70	22,80	7,90	NaN	-
16	10.7. 18:37 - 11.7. 09:37	15	6,23	1,33	6,05	1,34	NaN	-	7,30	4,00	6,50	2,30	NaN	-
17	18.7. 16:06 - 19.7. 09:06	17	6,89	1,75	6,80	1,71	6,08	1,63	13,70	6,40	14,60	5,10	7,80	-
18	19.7. 18:41 - 20.7. 08:41	14	4,78	0,93	4,65	0,97	4,23	0,96	27,30	-	27,30	-	20,50	9,70
19	24.7. 20:37 - 27.7. 10:37	62	11,31	4,37	10,61	4,28	9,01	3,94	17,40	9,30	16,50	8,80	12,80	6,70

4. Rezultati i diskusija

4.1. Parametar stabilnosti za buru srednjeg Jadrana

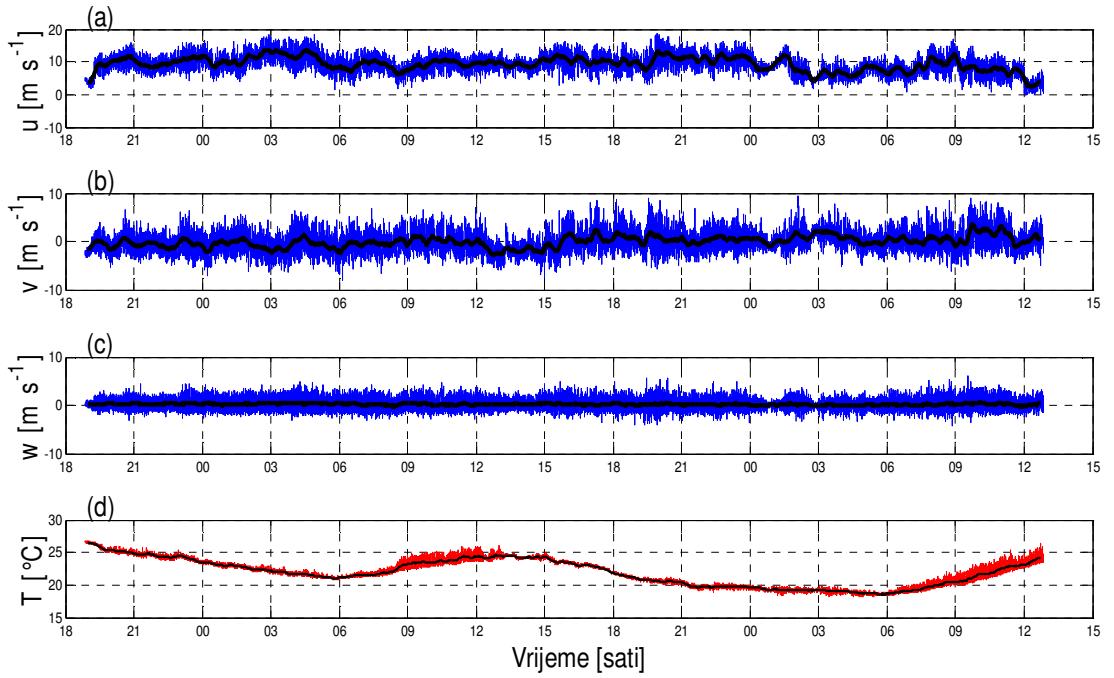
Baza podataka na kojoj je obavljena analiza sastoje se od 19 izdvojenih epizoda bure, u kojima su za svaku buru bile poznate x, y, z komponente brzine vjetra i sonična temperatura, i to na spomenute tri različite visine (10 m, 20 m i 40 m).

Prvotno je bilo potrebno za svaku epizodu bure napraviti jednostavnu rotaciju koordinatnog sustava odnosno prebaciti se iz specifičnog sustava anemometra (Slika 3.) u normalni desno orijentirani Kartezijev koordinatni sustav. Nakon toga je za svaku buru provedena rotacija koordinatnog sustava tako da x -os pokazuje u smjeru srednjeg horizontalnog vjetra, a y -os je okomita na nju, također u skladu s desno orijentiranim Kartezijevim sustavom. Daljnja obrada podataka radila se u tom sustavu.



Slika 3. a) Prikaz vlastitog koordinatnog sustava anemometra; b) Anemometar u vertikalnom položaju gdje je naznačena vertikalna komponenta brzine vjetra

Na Slici 4. je za primjer prikazana u zarotiranom sustavu bura u trajanju od 70 sati. Za buru srednjeg Jadrana ranije je određen period usrednjavanja od 17 minuta (npr. Magjarević, 2011.; Večenaj, 2012.). Na temelju toga napravljena je baza fluktuacija (perturbacija) oko srednjaka komponenata brzine u, v, w i sonične temperature T za svaku pojedinu buru pomoću relacije (1) te se moglo pristupiti daljnjoj obradi podataka.

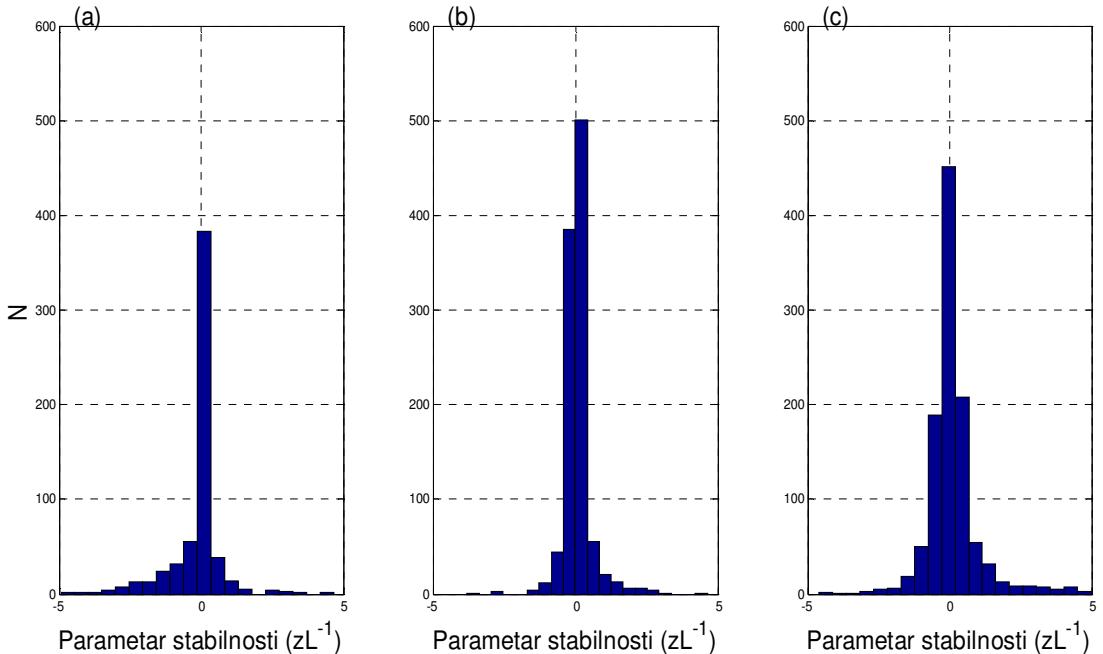


Slika 4. Dobivene vrijednosti u novom zarotiranom sustavu za buru #13 na 40 m, gdje su redom komponente brzine bure a) u , b) v , c) w prikazane plavo, d) sonična temperatura crveno i pripadni 17-minutni klizni srednjaci crno

Važno je napomenuti da anemometri nisu obavljali mjerjenja absolutne temperature, nego sonične temperature te se ista nije mogla koristiti pri računanju gradijenata temperature za relacije (14), (16a) i (16b). Stoga, funkcija sličnosti profila temperature nije ni testirana u ovom radu.

Dobivene vrijednosti perturbacija (u', v', w', T') za sve bure sortirane su na temelju pripadne visine u vremenski niz 30-minutnih blokova podataka u svrhu usrednjavanja kovarijanci i varijanci potrebnih za obradu. Tako je na primjer bura koja traje 13 sati (bura #1) podijeljena na 26 blokova od po 30 minuta, što nakon računanja određenog srednjaka daje 26 vrijednosti. Iz dobivenih vrijednosti perturbacija za sve epizode bura izračunate su vrijednosti turbulentnih tokova topoline $\overline{w'T'}$ i brzine trenja u_* te su pomoću relacije (12) dobivene vrijednosti za parametar stabilnosti $\frac{z}{L}$ na visini z od 10 m, 20 m i 40 m. Dobiveni rezultati su prikazani na Slici 5., gdje su zbog bolje preglednosti izbačene vrijednosti parametra stabilnosti koje izlaze iz intervala $\left|\frac{z}{L}\right| > 5$ (približno 1% vrijednosti parametra stabilnosti na

svakoj od tri visine). Vidljivo je da za ljetnu buru srednjeg Jadrana parametar stabilnosti najčešće poprima vrijednosti oko nule što znači da je promatrani sloj bure često približno neutralno stratificiran. To možemo objasniti dobrom izmješanostu površinskog sloja zbog velike horizontalne brzine vjetra.



Slika 5. Histogrami vrijednosti parametra stabilnosti na a) 10 m, b) 20 m i c) 40 m, gdje N predstavlja ukupni broj pojavljivanja parametra stabilnosti unutar promatranog razreda

Za testiranje Monin-Obukhove funkcije sličnosti profila vjetra za buru srednjeg Jadrana uzete su vrijednosti parametra stabilnosti u intervalu $-2 < \frac{z}{L} < 1$ (relacije (15a) i (15b)), što obuhvaća 90% ukupnih podataka. Za računanje standardnih devijacija uzete su vrijednosti parametra stabilnosti u intervalu $-2 < \frac{z}{L} < 2$, što obuhvaća 95% ukupnih podataka. Svi daljni proračuni za buru srednjeg Jadrana rađeni su na tim skupovima podataka.

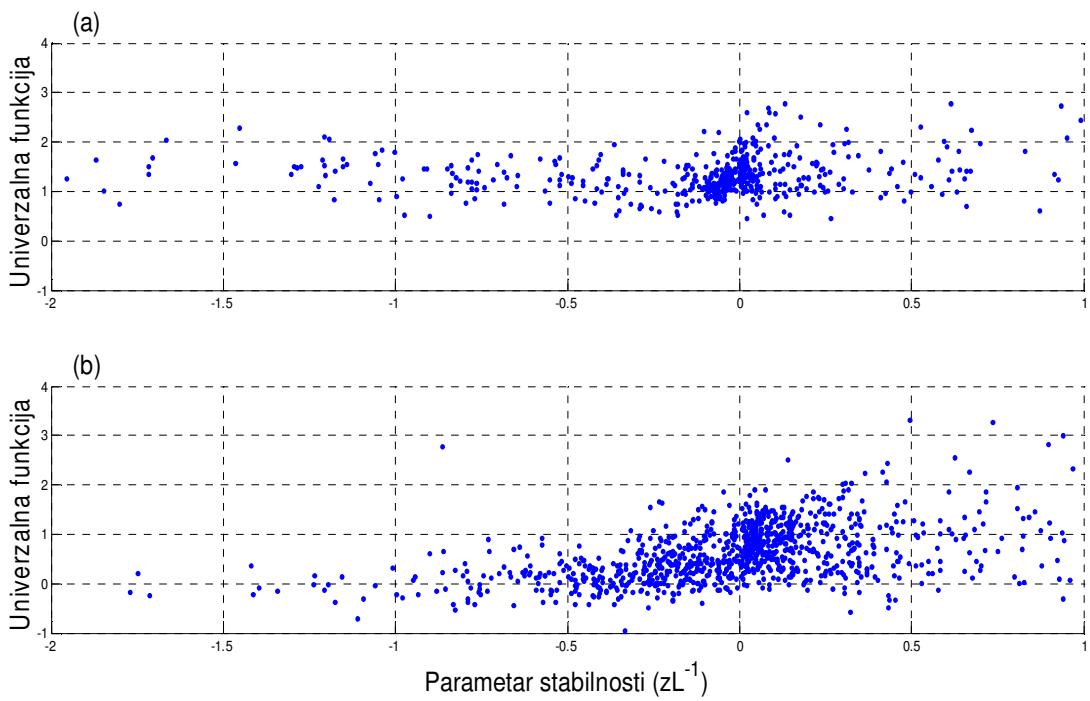
Zbog velikog raspršenja podataka (pogotovo za vrijednosti parametra stabilnosti blizu nule) koeficijent korelacije nije bio dobra mjera pouzdanosti izračunatih funkcija te je za ocjenu pogreške korišten korjen srednje kvadratne pogreške (eng. *Root Mean Square Error*, $RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(x_i - \bar{x})^2}{N}}$): gdje su redom x_i i \bar{x} vrijednosti funkcije dobivene najboljom

prilagodbom (*eng. best-fit*) i funkcije prijavljene u literaturi u ovisnosti o dobivenom parametru stabilnosti, a N je ukupni broj podataka).

4.2. Testiranje Monin-Obukhovih funkcija sličnosti

Iz skupa podataka formirana je bezdimenzionalna grupa za gradijent brzine vjetra $\left(\frac{k \cdot z}{u_*} \cdot \frac{\partial \bar{u}}{\partial z}\right)$.

Vrijednosti tako oformljene Buckinghamove Pi-grupe računate su na dva međunivoa, na visini z od 15 m i 30 m (uz von Kármánovu konstantu, $k = 0,4$). Navedene bezdimenzionalne grupe promatrane su u ovisnosti o vrsti stabilnosti te su dobiveni rezultati prikazani na Slici 6. Pripadne brzine trenja u_* na međunivoima 15 m i 30 m, kao i parametri stabilnosti $\frac{z}{L}$ računati su kao aritmetičke sredine gornjih i donjih graničnih nivoa.

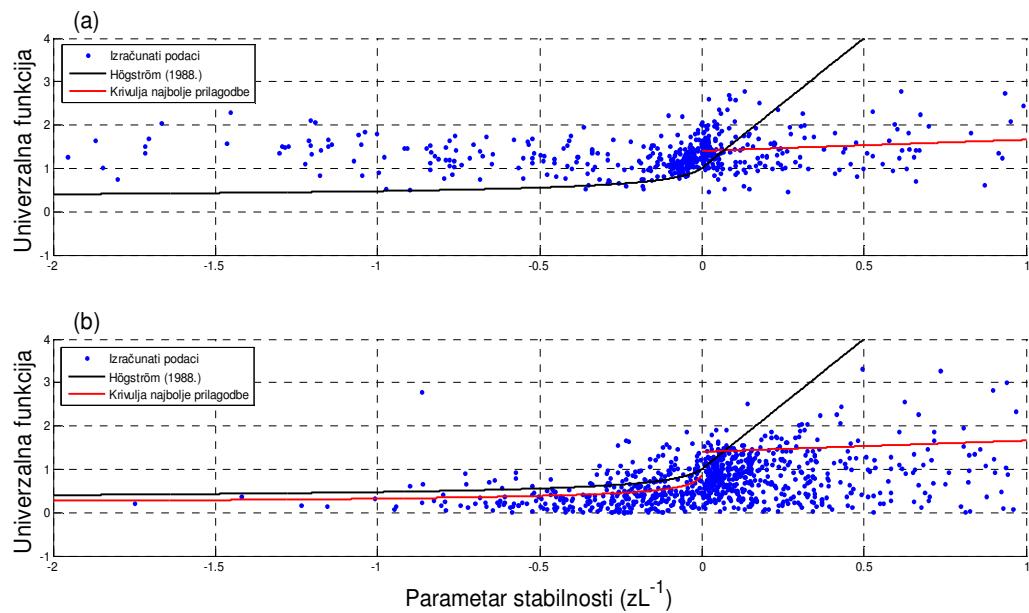


Slika 6. Univerzalne funkcije za gradijent brzine u ovisnosti u parametru $\frac{z}{L}$ na visini od a) 15 m i b) 30 m

Iz Slike 6. je vidljivo da na visini od 30 m univerzalna funkcija poprima i negativne vrijednosti duž cijelog intervala promatrane vrste stabilnosti. Proučavajući relaciju (14) možemo zaključiti da se negativne vrijednosti javljaju zbog vertikalno opadajućeg profila

vjetra u tom vremenskom trenutku mjerena (gradijent brzine $\frac{\partial \bar{u}}{\partial z}$ poprima negativne vrijednosti). Ranije je rečeno da je MOTS izvedena na temelju nekoliko prepostavki, a jedna od navedenih je uvažavala vertikalno rastući logaritamski profil vjetra. Iz tog razloga sve negativne vrijednosti univerzalne funkcije na 30 m nisu uzete u obzir pri testiranju MOTS funkcije (oko 12% ukupnih podataka).

Uvažavajući funkcionalnu ovisnost u relacijama (15a) i (15b) za statički nestabilnu stratifikaciju $\left(\frac{z}{L} < 0\right)$ prepostavljena ovisnost o parametru stabilnosti je $\varphi_m\left(\frac{z}{L}\right) = a_m(1 - b_m \frac{z}{L})^{-\frac{1}{4}}$, a za stabilnu stratifikaciju $\left(\frac{z}{L} > 0\right)$ uzeta je relacija $\varphi_m\left(\frac{z}{L}\right) = a_m + b_m \frac{z}{L}$ (gdje su a_m i b_m slobodni koeficijenti koji su određeni najboljom prilagodbom na izračunate vrijednosti). Za statički nestabilnu stratifikaciju na visini od 15 m izračunate vrijednosti univerzalne funkcije ne prate standardni oblik Monin-Obukhovih krivulja (npr. Foken i Skeib, 1983.; Högström, 1988.; Handorf i sur., 1999.) te iz tog razloga nije napravljena najbolja prilagodba. Funkcije za dobivene koeficijente su prikazane na Slici 7. zajedno s Högströmovim relacijama (15a) i (15b).



Slika 7. Dobivene univerzalne funkcije za gradijent brzine na a) 15 m i b) 30 m (crveno) i univerzalne funkcije prema Högströmu (crno)

Iz Slike 7. vidimo da Högströmova funkcija za nestabilnu stratifikaciju relativno dobro prati dobivene rezultate na 30 m. Za stabilnu stratifikaciju Högströmova funkcija loše opisuje izračunate vrijednosti. Pouzdanost dobivenih funkcijskih ovisnosti prikazana je u Tablici 2. zajedno s izračunatim slobodnim koeficijentima.

Tablica 2. Koeficijenti za Monin-Obukhove funkcije sličnosti (vidi iznad) zajedno s pripadnim pogreškama

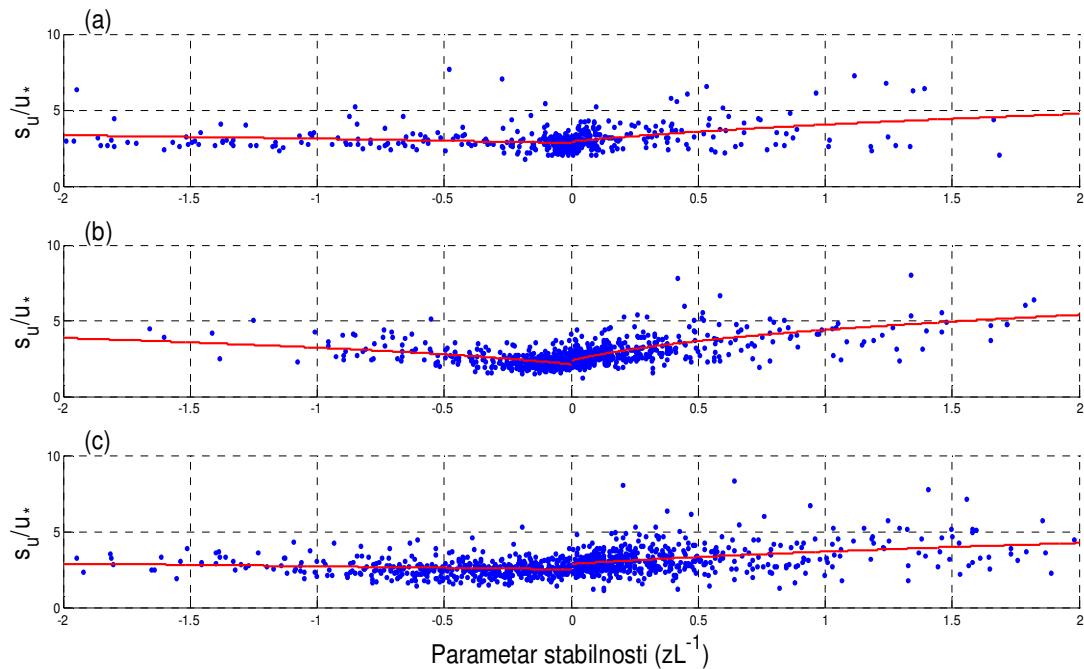
φ_m									
$-2 < \frac{Z}{L} < 0$	a_m	b_m	RMSE	RMSE (Högström)	$0 < \frac{Z}{L} < 1$	a_m	b_m	RMSE	RMSE (Högström)
15 m	-	-	-	0,64	15 m	$1,40 \pm 0,07$	$0,26 \pm 0,22$	0,42	1,44
30 m	$0,85 \pm 0,27$	$47,12 \pm 0,26$	0,37	0,42	30 m	$0,85 \pm 0,06$	$0,26 \pm 0,20$	0,52	1,97

Za statički nestabilan režim dobiveni koeficijenti su u dobrom slaganju s onima iz literature, a veće razlike se javljaju u dobivenoj vrijednosti za b_m . Za statički stabilno strujanje dobiveni koeficijenti pokazuju velike razlike u odnosu na Högströmove, točnije koeficijenti b_m su znatno različiti što se može vidjeti i iz Slike 7. (velika razlika u nagibu pravca za statički stabilan režim).

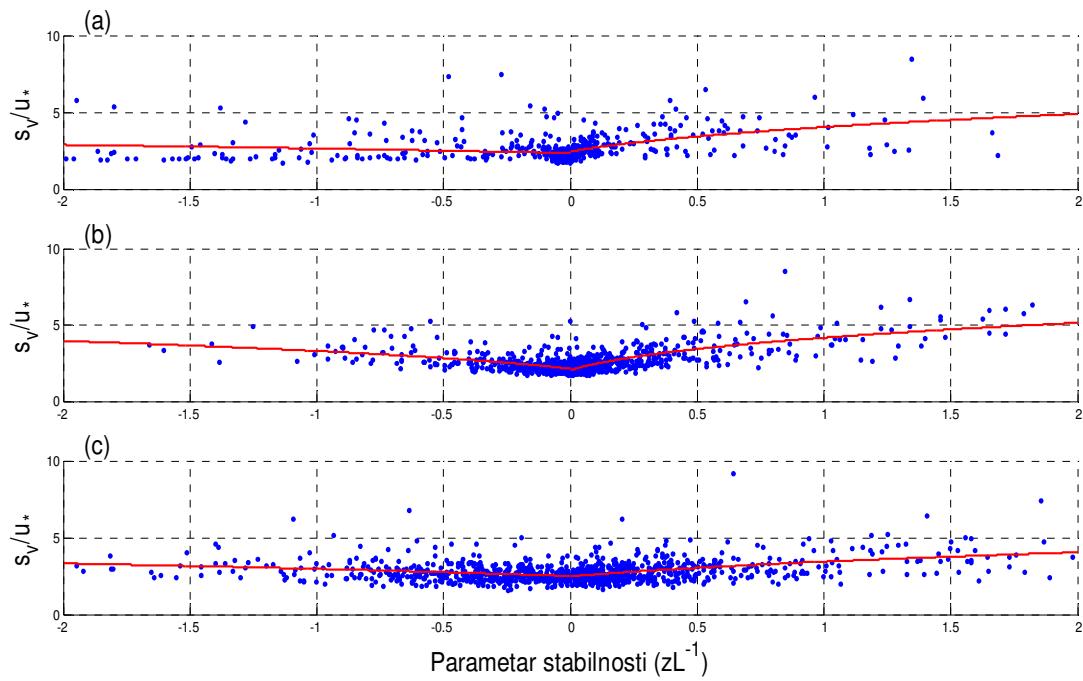
4.3. Standardne devijacije

4.3.1. Standardne devijacije brzine vjetra

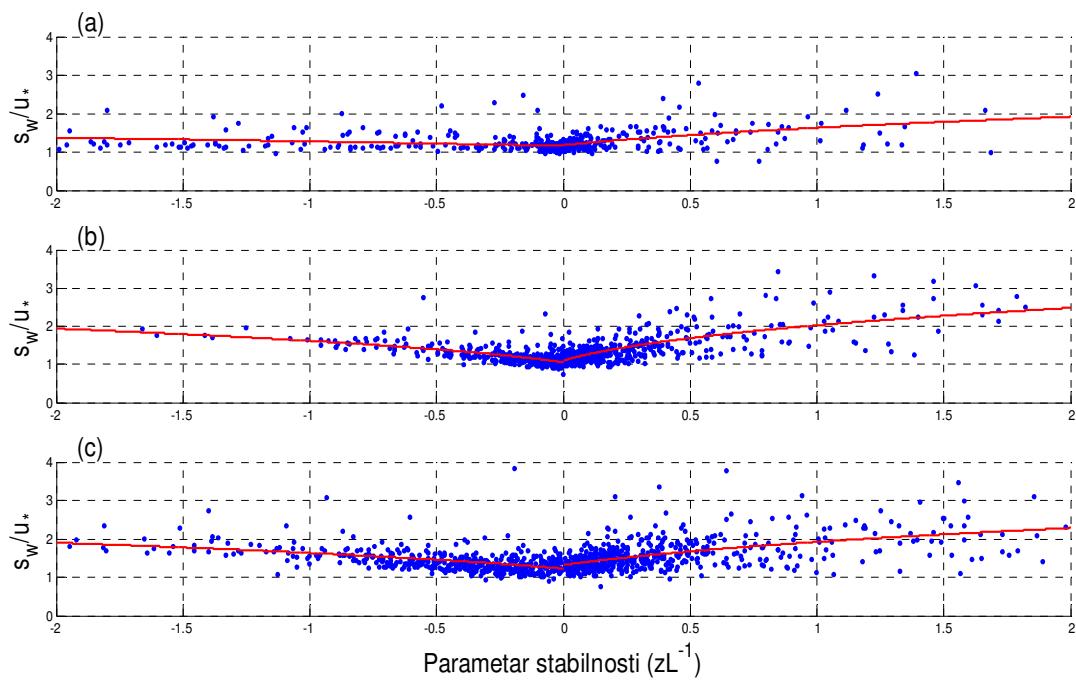
Na temelju izdvojenih podataka $\left(-2 < \frac{z}{L} < 2\right)$ formirane su bezdimenzionalne Buckinghamove Pi-grupe za standardne devijacije x, y, z komponente brzine vjetra. Standardne devijacije $\sigma_u, \sigma_v, \sigma_w$ bezdimenzionalizirane su brzinama trenja u_* . Ponašanje tako oformljenih bezdimenzionalnih grupa promatrano je u ovisnosti o vrsti stabilnosti na visini od 10 m, 20 m i 30 m. Slike 8.-10. prikazuju dobivene rezultate za standardne devijacije brzine vjetra u ovisnosti o vrsti stabilnosti. Relacija (18) usvojena je kao funkcija sličnosti, a koeficijenti dobiveni za krivulje najbolje prilagodbe prijavljeni su u Tablicama 3.-5. te su za usporedbu dodatno stavljeni predloženi rezultati radova različitih autora. Vidljivo je raspršenje podataka na Slikama 8.-10. koje je za horizontalne komponente veće nego za vertikalnu komponentu. Vrijednosti pogrešaka (RMSE) predstavljaju ocjenu dobivenih funkcija u odnosu na one objavljene u literaturi.



Slika 8. Dobivene vrijednosti za bezdimenzionalne standardne devijacije x -komponente brzine vjetra (plavo) zajedno s krivuljom najbolje prilagodbe (crveno) za visine a) 10 m, b) 20 m i c) 40 m



Slika 9. Dobivene vrijednosti za bezdimenzionalne standardne devijacije y -komponente brzine vjetra (plavo) zajedno s krivuljom najbolje prilagodbe (crveno) za visine a) 10 m, b) 20 m i c) 40 m



Slika 10. Dobivene vrijednosti za bezdimenzionalne standardne devijacije z -komponente brzine vjetra (plavo) zajedno s krivuljom najbolje prilagodbe (crveno) za visine a) 10 m, b) 20 m i c) 40 m

Tablica 3. Dobiveni koeficijenti (relacija (17)) za bezdimenzionalne standardne devijacije x -komponente brzine vjetra u ovisnosti o vrsti stabilnosti (*upotrebljen je rekurzivni filter predložen od de Franceschi i Zardi (2003.))

$\frac{\sigma_u}{u_*}$							
$-2 < \frac{Z}{L} < 0$	a_u	b_u	RMSE	$0 < \frac{Z}{L} < 2$	a_u	b_u	RMSE
10 m	2,85±0,08	0,31±0,19	0,61	10 m	2,93 ± 0,13	1,64±0,64	0,77
20 m	2,12±0,07	2,52±0,63	0,46	20 m	2,35 ± 0,10	5,54±1,22	0,76
40 m	2,50±0,08	0,27±0,12	0,54	40 m	2,86 ± 0,38	1,12±0,38	0,82
de Franceschi i sur. (2009.)	2,02	5,14	0,89	de Franceschi i sur. (2009.)	2,02	22,50	1,14
			0,49				0,98
			0,79				1,31
de Franceschi i sur. (2009.) – dFZ filter*	1,80	0,78	0,77	de Franceschi i sur. (2009.) – dFZ filter*	1,92	1,01	0,98
			0,51				0,87
			0,67				1,12
Quan i Hu (2009.)	2,03	0,50	0,66	Quan i Hu (2009.)	1,96	2,07	0,91
			0,57				0,83
			0,71				1,02

Tablica 4. Dobiveni koeficijenti (relacija (17)) za bezdimenzionalne standardne devijacije y -komponente brzine vjetra u ovisnosti o vrsti stabilnosti (*upotrebljen je rekurzivni filter predložen od de Franceschi i Zardi (2003.))

$\frac{\sigma_v}{u_*}$							
$-2 < \frac{Z}{L} < 0$	a_v	b_v	RMSE	$0 < \frac{Z}{L} < 2$	a_v	b_v	RMSE
10 m	$2,35 \pm 0,12$	$0,43 \pm 0,32$	0,61	10 m	$2,45 \pm 0,13$	$3,49 \pm 1,13$	0,74
20 m	$2,13 \pm 0,07$	$2,71 \pm 0,65$	0,46	20 m	$2,03 \pm 0,07$	$7,65 \pm 1,34$	0,56
40 m	$2,50 \pm 0,10$	$0,68 \pm 0,30$	0,59	40 m	$1,67 \pm 0,09$	$1,67 \pm 0,44$	0,66
de Franceschi i sur. (2009.)	2,09	4,81	0,97	de Franceschi i sur. (2009.)	2,21	16,60	1,06
			0,49				0,98
			0,74				1,48
de Franceschi i sur. (2009.) – dFZ filter*	1,63	1,32	1,00	de Franceschi i sur. (2009.) – dFZ filter*	1,71	1,68	1,27
			0,83				1,07
			1,02				1,11
Quan i Hu (2009.)	1,71	1,05	0,83	Quan i Hu (2009.)	1,80	1,78	0,92
			0,50				0,73
			0,66				1,11

Tablica 5. Dobiveni koeficijenti (relacija (17)) za bezdimenzionalne standardne devijacije z-komponente brzine vjetra u ovisnosti o vrsti stabilnosti (*upotrebljen je rekurzivni filter predložen od de Franceschi i Zardi (2003.))

$\frac{\sigma_w}{u_*}$							
$-2 < \frac{Z}{L} < 0$	a_w	b_w	RMSE	$0 < \frac{Z}{L} < 2$	a_w	b_w	RMSE
10 m	1,16±0,03	0,33±0,15	0,19	10 m	1,18±0,04	1,64±0,50	0,24
20 m	1,06±0,02	2,56±0,42	0,15	20 m	1,10±0,03	5,23±0,78	0,24
40 m	1,23±0,04	1,35±0,36	0,25	40 m	1,32±0,05	2,09±0,47	0,33
de Franceschi i sur. (2009.)	1,06	6,48	0,47	de Franceschi i sur. (2009.)	1,12	1,42	0,25
			0,24				0,33
			0,36				0,44
de Franceschi i sur. (2009.) – dFZ filter*	1,27	2,82	0,45	de Franceschi i sur. (2009.) – dFZ filter*	1,32	0,88	0,27
			0,29				0,31
			0,34				0,36
Quan i Hu (2009.)	1,33	1,27	0,38	Quan i Hu (2009.)	1,42	0,54	0,32
			0,28				0,35
			0,33				0,37

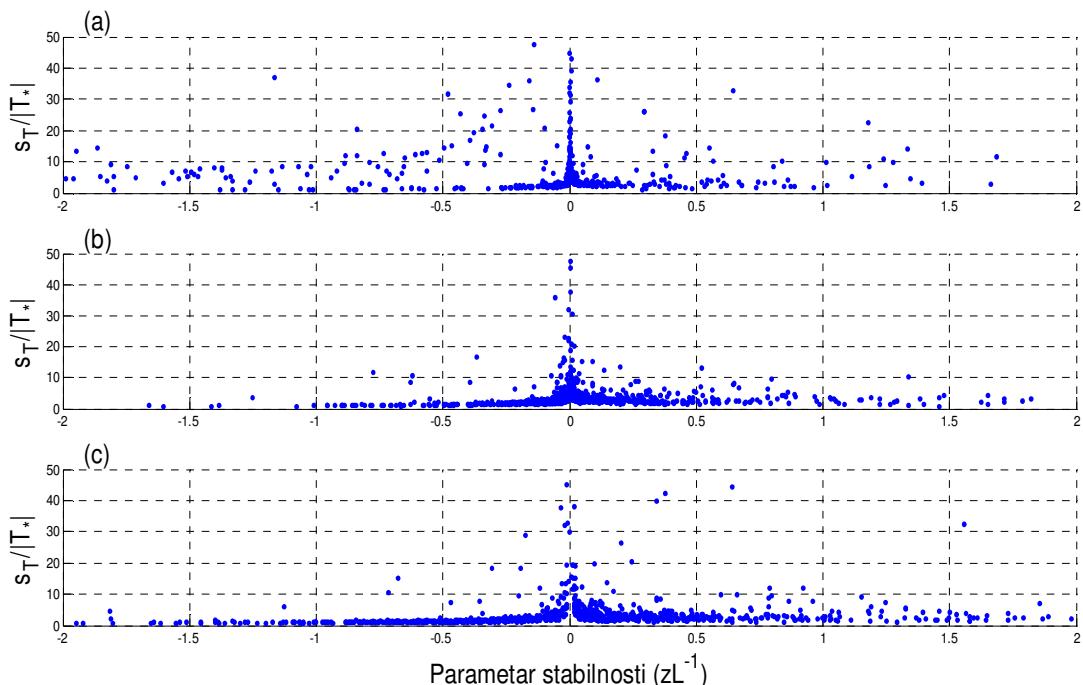
Analizirajući koeficijente a_i za $\frac{Z}{L} \rightarrow 0^+$ i $\frac{Z}{L} \rightarrow 0^-$ vidimo zanemarive razlike u dobivenim vrijednostima (nema velikog skoka iz nestabilnog u stabilno stratificirani režim strujanja). Dobivene krivulje za bezdimezionalne standardne devijacije z-komponente brzine vjetra pokazuju bolje slaganje s publiciranim rezultatima u literaturi nego horizontalne komponente.

Može se zaključiti da je bezdimenzionalna standardna devijacija vertikalne komponente neovisna o obliku terena i promjenama u toku uzrokovanim kompleksnim terenom (npr. Panofsky i Dutton, 1984.).

Dobiveni koeficijenti a_u i a_v poprimaju bliske vrijednosti što znači da postoje manje razlike između u i v komponente u horizontalnom turbulentnom polju. To se može objasniti utjecajem okolne orografije na veličinu turbulentnih fluktuacija odnosno širinom terena jer u slučaju strujanja nad homogenim terenom longitudinalna komponenta bi trebala poprimati veće vrijednosti od lateralne komponente (npr. de Franceschi i sur., 2009.).

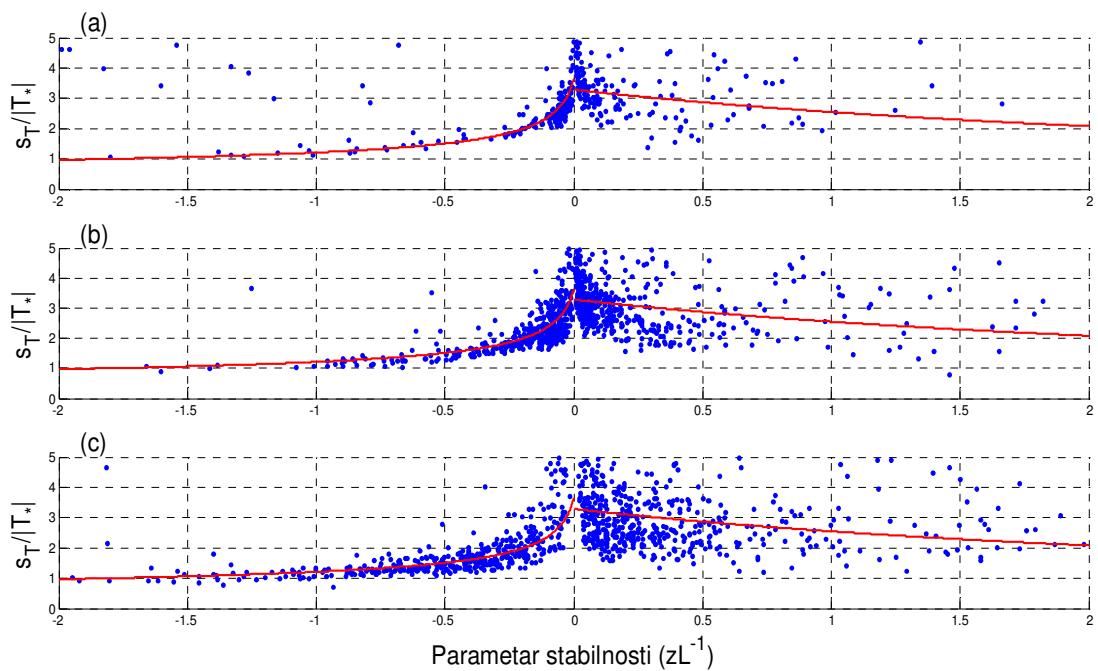
4.3.2. Standardna devijacija temperature

Iz izdvojenog skupa podataka $(-2 < \frac{z}{L} < 2)$ također su formirane Buckinghamove Pi-grupe za standardne devijacije temperature bezdimenzionalizirane pomoću T_* . Promatrana je njihova ovisnost o vrsti stabilnosti za visine 10 m, 20 m i 40 m. Dobiveni rezultati prikazani su na Slici 11.



Slika 11. Dobivene vrijednosti za bezdimenzionalne standardne devijacije temperature (plavo) za visine a) 10 m, b) 20 m i c) 40 m

Kod analize bezdimenzionalne standardne devijacije temperature javljaju se problemi što se više približavamo neutralnoj statičkoj stabilnosti. Naime, kod podataka u intervalu stabilnosti $\left| \frac{z}{L} \right| < 0.2$, omjer $\frac{s_T}{|T_*|}$ postaje neodređen jer brojnik i nazivnik poprimaju vrlo male vrijednosti (npr. Tampieri i sur., 2009.) pa se u tom intervalu javlja veliko raspršenje podataka (Slika 11.). Iz tog su razloga uklonjene gornje nerealne vrijednosti na sve tri visine te one nisu korištene u daljnjoj analizi (uklonjeno je 36% podataka na 10 m, 14% na 20 m i 13% na 40 m). Za funkciju najbolje prilagodbe u ovisnosti o vrsti stabilnosti uzete su relacije (18). Dobivene krivulje prikazane su na Slici 12., a izračunati koeficijenti a_T i b_T prikazani su u Tablici 6. zajedno s rezultatima radova različitih autora.



Slika 12. Dobivene vrijednosti za bezdimenzionalne standardne devijacije temperature (plavo) zajedno s krivuljom najbolje prilagodbe (crveno) za visine a) 10 m, b) 20 m i c) 40 m

Tablica 6. Dobiveni koeficijenti (relacija (18)) za bezdimenzionalne standardne devijacije temperature u ovisnosti o vrsti stabilnosti (*upotrebljen je rekurzivni filter predložen od de Franceschi i Zardi (2003.))

$\frac{\sigma_T}{u_*}$							
$-2 < \frac{Z}{L} < 0$	a_T	b_T	RMSE	$0 < \frac{Z}{L} < 2$	a_T	b_T	RMSE
10 m	$2,78 \pm 0,14$	$1,63 \pm 1,09$	0,70	10 m	$3,41 \pm 0,16$	$0,26 \pm 0,17$	0,73
20 m	$3,64 \pm 0,26$	$25,99 \pm 8,21$	0,48	20 m	$3,29 \pm 0,09$	$0,29 \pm 0,10$	0,74
40 m	$10,19 \pm 0,23$	$559,80 \pm 123,51$	0,49	40 m	$3,03 \pm 0,11$	$0,15 \pm 0,08$	0,82
de Franceschi i sur. (2009.)	3,22	22,5	0,79	de Franceschi i sur. (2009.)	3,16	0,08	0,75
			0,52				0,76
			0,59				0,84
de Franceschi i sur. (2009.) – dFZ filter*	2,44	9,18	0,93	de Franceschi i sur. (2009.) – dFZ filter*	2,87	0,003	0,83
			0,66				0,81
			0,67				0,83
Ramana i sur. (2004.)	6,56	9,5	0,82	Ramana i sur. (2004.)	6,45	0,25	0,74
			0,65				0,78
			0,53				0,84

Dobivene relacije za standardnu devijaciju temperature u dobrom su slaganju s podacima. Za nestabilnu i statički stabilnu stratifikaciju dobiveni koeficijenti a_T bliski su onima objavljenim u literaturi (osim na visini od 20 m i 40 m za $-2 < \frac{Z}{L} < 0$ gdje dolazi do većih razlika u dobivenim vrijednostima). Za statički stabilnu stratifikaciju koeficijenti b_T poprimaju male vrijednosti; što se više približavaju nuli ($b_T \rightarrow 0$), dobivena funkcija ovisnosti bezdimenzionalne standardne devijacije temperature može se bolje aproksimirati konstantom koja ne ovisi o parametru stabilnosti $\frac{Z}{L}$.

5. Zaključak

Za vrijeme ljetnih bura na srednjem Jadranu pokazano je da se 95% vrijednosti parametra stabilnosti za prizemni sloj atmosfere nalazi u intervalu $-2 < \frac{z}{L} < 2$ (dvije standardne devijacije parametra stabilnosti ulijevo i udesno od srednje vrijednosti za $\frac{z}{L}$). Prepostavljena funkcija ovisnost za Monin-Obukhovu univerzalnu funkciju profila vjetra pokazala se kao dobar odabir za opisivanje prizemne turbulencije kod bure srednjeg Jadrana nad kompleksnim terenom za cijeli interval promatrane vrste stabilnosti. Za statički nestabilan režim na visini od 15 m imamo slabije slaganje izmjerjenih podataka s Högströmovim funkcijama, dok na visini od 30 m njegove predložene funkcije jako dobro opisuju izmjerene podatke što se i vidi usporedbom pripadnih pogrešaka za obje univerzalne funkcije. Dakle, možemo reći da one vrijede u statički nestabilnom režimu strujanja. U stabilno stratificiranom režimu Högströmove univerzalne funkcije pokazale su se kao izrazito loš opis za izračunate vrijednosti turbulentnih karakteristika pri epizodama ljetne bure. Izračunate univerzalne funkcije najboljom prilagodbom na podatke dobro prate izmjerene vrijednosti te su uz pripadnu manju RMSE prikladnije za opisivanje turbulentnih karakteristika u stabilnoj domeni. To je ujedno i jedan od glavnih doprinosova ovog rada.

Kod računanja momenata drugog reda dobivene funkcije sličnosti za standardne devijacije brzine vjetra jako dobro su pratile izračunate vrijednosti. Time je potvrđeno da je ovaj odabir funkcija ovisnosti između mnogo predloženih u literaturi zadovoljavajući te nema razloga da se ne koristi i dalje pri proučavanju turbulentnih karakteristika bure srednjeg Jadrana. Horizontalne komponente za bezdimenzionalne standardne devijacije poprimale su bliske vrijednosti što se možda može objasniti utjecajem okolne orografije na karakteristike turbulentnih fluktuačija u longitudinalnom i lateralnom smjeru. Moguće je da utjecaj okolnog terena ima ključnu ulogu na horizontalne karakteristike turbulencije. Vertikalna komponenta bezdimenzionalnih standardnih devijacija pokazuje manje raspršenje od horizontalnih komponenti što je u skladu s rezultatima u literaturi i može se smatrati da je ovisna samo o vrsti statičke stabilnosti.

Bezdimenzionalne standardne devijacije temperature zbog problema koji se javljaju blizu statičke neutralnosti, odnosno velikog pripadnog raspršenja, zahtjevaju pozornost pri analizi.

Pretpostavljene funkcijeske ovisnosti dobro opisuju dobivene podatke o vrsti statičke stabilnosti. U statički nestabilnom režimu strujanja dobiveni koeficijenti a_T dobro se slažu s onima iz literature. Nadalje, dobivene male vrijednosti za koeficijente b_T ukazuju na to da bi opravdano bilo zamjeniti ovisnost o parametru stabilnosti s nekom konstantnom vrijednosti. Također, podaci za statički stabilan režim strujanja pokazuju veće raspršenje od onih u prethodnom režimu zbog moguće ovisnosti u nekim drugim parametrima koji nisu uzeti u obzir u ovom radu.

Na kraju, može se reći da teorija sličnosti tek djelomice vrijedi za ljetnu buru na srednjem Jadranu, te bi bilo vrijedno sličnu analizu provesti na zimskim burama srednjeg Jadrana.

6. Literatura

- Babić, N., 2013.: Proučavanje turbulentnih tokova bure u navjetrini Splita. *Diplomski rad*, Geofizički odsjek PMF-a, 48 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.
- Bencetić Klaić, Z., Belušić, D., Grubišić, V., Gabela, L. i Čoso, 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.
- Bovscheverov, V. M. i Voronov, V. P., 1960.: Acoustic rotor. *Izv. AN SSSR, ser. Geofiz.* **6**, 882-885.
- Brzović, N., 1999.: Factors affecting the Adriatic cyclone and associated windstorms. *Contrib. Atmos. Phys.* **72**, 51-65.
- Businger, J. A., Wyngaard, J. C., Izumi, Y. i Bradley, E. F., 1971.: Flux-profile relationships in the atmospheric surface layer. *J. Atmos. Sci.* **28**, 181-189.
- de Franceschi, M., Zardi, D., 2003.: Evaluation of cut-off frequency and correction of filter-induced phase lag and attenuation in eddy covariance analysis of turbulence data. *Boundary-Layer Meteorol.* **108**, 289-303.
- de Franceschi, M., Zardi, D., Tagliazzucca, M. i Tampieri, F., 2009.: Analysis of second-order moments in surface layer turbulence in an Alpine valley. . *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* **135**, 1750-1765.

Dyer, A. J. i Hicks, B. B., 1970.: Flux-gradient relationships in the constant flux layer. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* **96**, 715-721.

Dyer, A. J., Garratt, J. R., Francey, R. J., McIlroy, I. C., Bacon, N. E., Hyson, P., Bradley, E. F., Denmead, D. T., Tsvang, L. R., Volkov, J. A., Kaprov, B. M., Elagina, L. G., Sahashi, K., Monji, N., Hanafusa, T., Tsukamoto, O., Frenzen, P., Hicks, B. B., Wesely, M., Miyake, M. i Shaw, W. J., 1982.: An International Turbulence Comparison Experiment (ITCE 1976). *Boundary-Layer Meteorol.* **24**, 181-209.

Enger, L. i Grisogono, B., 1998.: The response of bora-type flow to sea surface temperature. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* **124**, 1227-1224.

Foken, T. i Skeib, G., 1983.: Profile measurements in the atmospheric near-surface layer and the use of suitable universal functions for the determination of the turbulent energy exchange. *Boundary-Layer Meteorol.* **25**, 55-62.

Foken, T., 2006.: 50 years of the Monin-Obukhov similarity theory. *Boundary-Layer Meteorol.* **119**, 431-447.

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

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

Hanafusa, T., Fujitana, T., Kobori, Y. i Mitsuta, Y., 1982.: A new type sonic anemometer-thermometer for field operation. *Papers Meteorol. & Geophys.* **33**, 1-19.

Handorf, D., Foken, T. i Kottmeier, C., 1999.: The stable atmospheric boundary layer over an Antarctic ice sheet. *Boundary-Layer Meteorol.* **91**, 165-186.

Högström, U., 1988.: Non-dimensional wind and temperature profiles in the atmospheric surface layer: A re-evaluation. *Boundary-Layer Meteorol.* **42**, 55-78.

Högström, U., 1990.: Analysis of turbulence structure in the surface layer with a modified similarity formulation for near neutral conditions. *J. Atmos. Sci.* **47**, 1949-1972.

Howell, J. F. i Sun, J., 1999.: Surface-layer fluxes in stable conditions. *Bound.-Layer Meteor.* **90**, 495–520.

Izumi, Y., 1971.: KANSAS 1968 field program data report. Bedford, MA, Air Force Cambridge Research Papers, No. 379, 79 str.

Jeričević, A. i Grisogono, B., 2006.: The critical bulk Richardson number in urban areas: verification and application in a numerical weather prediction model. *Tellus 58A*, 19-27.

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.

Magjarević, V., 2011.: Mikroskala ljetne bure na srednjem Jadranu. *Diplomski rad*, Geofizički odsjek PMF-a, 30. str.

Mauritsen, T., Svensson, G., Zilitinkevich, S. S., Esau, I., Enger, L., i Grisogono, B., 2007.: A total turbulent energy closure model for neutrally and stably stratified atmospheric boundary layers. *J. Atmos. Sci.* **64**, 4113-4126.

McNaughton, K., 2006.: On the kinetic energy budget of the unstable atmospheric surface layer. *Boundary-Layer Meteorol.* **118**, 83–107.

Monin, A. S. i Obukhov, A. M., 1954.: Basic laws of turbulent mixing in the atmosphere near the ground. *Trudy geofiz. inst. AN SSSR* **24**(151), 163-187.

Monin, A. S. i Yaglom, A. M., 1973.: *Statistical fluid mechanics: Mechanics of turbulence*, Vol. 1. MIT Press, Cambridge, London, 769 str.

Montgomery, R. B., 1948.: Vertical eddy flux of heat in the atmosphere. *J. Meteorol.* **5**, 265-274.

Obukhov, A. M., 1946.: Turbulence in atmosphere with a non-uniform temperature. *Trudy Inst. Theor. Geofiz. AN SSSR* **1**, 95-115.

- 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.
- Panofsky, H. A. i Dutton, J. A., 1984.: *Atmospheric turbulence. Models and methods for engineering applications.* J. Wiley and Sons: New York.
- Piper, M. i Lundquist, J. K., 2004: Surface layer turbulence measurements during a frontal passage. *J. Atmos. Sci.*, **61**, 1768–1780.
- Poje, D., 1992.: Wind persistence in Croatia. *Int. J. Clim.* **12**, 569-586.
- Prandtl, L., 1925.: Bericht über Untersuchungen zur ausgebildeten Turbulenz. *Z. angew. Math. Mech.* **5**, 136-139.
- Quan, L. i Hu, F., 2009.: Relationship between turbulent flux and variance in the urban canopy. *Meteorol. Atmos. Phys.* **104**, 29-36.
- Ramana, M. V., Krishnan, P. i Kunhikrishnan, P. K., 2004.: Surface boundary-layer characteristics over a tropical inland station: Seasonal features. *Boundary-Layer Meteorol.* **111**, 153-157.
- Smedman, A. S., 1988: Observations of multi-level turbulence structure in a very stable atmospheric boundary layer. *Bound.-Layer Meteorol.* **44**, 231–253.
- Smith, R. B., 1987.: Aerial observation of the Yugoslavian Bora. *J. Atmos. Sci.*, **44**, 269-297.
- Smith, R. B. i Sun, J., 1987.: Generalized hydraulic solutions pertaining to severe downslope winds. *J. Atmos. Sci.* **44**, 2934–2939.
- Stull, R. B., 1988.: An introduction to boundary layer meteorology. *Kluwer Academic Publishers*, Dordrecht, Nizozemska, 666 str.
- Tampieri, F., Maurizi, A. i Viola, A., 2009.: An investigation on temperature variance scaling in the atmospheric surface layer. *Boundary-Layer Meteorol.* **132**, 31-42.
- 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., 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.

Vickers, D i Mahrt, L., 2003.: The cospectral gap and turbulent flux calculations. *J. Atmos. Oceanic Technol.* **20**, 660-672.

Webb, E. K., 1970.: Profile relationships: The log-linear range, and extension to strong stability. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* **96**, 67-90.

Wieringa, J., 1980.: A revaluation of the Kansas mast influence on measurements of stress and cup anemometer overspeeding. *Boundary-Layer Meteorol.* **18**, 411-430.

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

Zilitinkevich, S. S. i Tschalikov, D. V., 1968.: Determination of universal profiles of wind velocity and temperature in the surface layer of the atmosphere. *Izv. AN SSSR, Fiz. Atm. i Okeana* **4**, 294-302.