

# Značajke bure u prizemnom sloju atmosfere iznad brdovitog terena

---

Lepri, Petra

Doctoral thesis / Disertacija

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:880109>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-24**



Repository / Repozitorij:

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





Sveučilište u Zagrebu

PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
GEOFIZIČKI ODSJEK

Petra Lepri

**ZNAČAJKE BURE U PRIZEMNOM SLOJU  
ATMOSFERE IZNAD BRDOVITOG TERENA**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2023.





Sveučilište u Zagrebu

PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
GEOFIZIČKI ODSJEK

Petra Lepri

# **ZNAČAJKE BURE U PRIZEMNOM SLOJU ATMOSFERE IZNAD BRDOVITOG TERENA**

DOKTORSKI RAD

Mentori: Prof. dr. sc. Hrvoje Kozmar  
Doc. dr. sc. Željko Večenaj

Zagreb, 2023.





University of Zagreb

FACULTY OF SCIENCE  
DEPARTMENT OF GEOPHYSICS

Petra Lepri

**BORA WIND CHARACTERISTICS IN THE  
SURFACE LAYER ABOVE COMPLEX  
TERRAIN**

DOCTORAL DISSERTATION

Supervisors: Prof. dr. sc. Hrvoje Kozmar  
Doc. dr. sc. Željko Večenaj

Zagreb, 2023



Ova doktorska disertacija izrađena je na Državnom hidrometeorološkom zavodu u Zagrebu uz mentorstvo prof. dr. sc. Hrvoja Kozmara i doc. dr. sc. Željka Večenaja, u sklopu Sveučilišnog poslijediplomskog studija pri Geofizičkom odsjeku Prirodoslovno matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Mentor prof. dr. sc. Hrvoje Kozmar redoviti je profesor pri Zavodu za dinamiku fluida Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu.

Mentor doc. dr. sc. Željko Večenaj je docent pri Geofizičkom odsjeku Prirodoslovno matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Ova doktorska disertacija je temeljena na analizi mjerenja bure na meteorološkom tornju u prirodi. Analizirani su profili usrednjenih vrijednosti brzine puhanja i integralnih parametara turbulencije bure, kao i spektralne značajke pulzacija bure. Temelj ove doktorske disertacije su tri objavljena znanstvena članka u relevantnim međunarodnim časopisima:

1. Lepri Petra, Kozmar Hrvoje, Večenaj Željko, Grisogono Branko (2014) A summertime near-ground velocity profile of the Bora wind, *Wind and Structures* 19(5), 505-522.
2. Lepri Petra, Večenaj Željko, Kozmar Hrvoje, Grisogono Branko (2015) Near-ground turbulence of the Bora wind in summertime, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 147, 345-357.
3. Lepri Petra, Večenaj Željko, Kozmar Hrvoje, Grisogono Branko (2017) Bora wind characteristics for engineering applications, *Wind and Structures* 24(6), 579-611.





Zahvale:

Zahvaljujem svojim mentorima prof. dr. sc. Hrvoju Kozmaru i doc. dr. sc. Željku Večenaju na pruženoj prilici, strpljenju, pomoći i vodstvu pri provedbi ovog istraživanja.

Zahvaljujem prof. dr. sc. Branku Grisogonu na pruženoj prilici, razumijevanju, pomoći i podršci.

Želim zahvaliti članovima povjerenstva za ocjenu doktorskog rada, izv. prof. dr. sc. Maji Telišman Prtenjak, dr. sc. Ameli Jeričević i prof. dr. sc. Danijelu Belušiću na uloženom trudu, korisnim komentarima i sugestijama koje su ovaj rad učinile kvalitetnijim i potpunijim.

Zahvaljujem mom šefu Eugenu Zobaju na podršci koju mi je pružio tijekom mog doktorskog studija.

Posebno bih se željela zahvaliti mojim dragim prijateljicama Ani, Ivani, Diani, Ani i Sandi na ohrabrenjima i podršci u naizgled bezizlaznim situacijama.

Najveće hvala mojim roditeljima na razumijevanju i podršci tijekom mog doktorskog studija.



## SAŽETAK

Bura je vrlo jak, najčešće suh i mahovit vjetar koji puše iz smjera sjeveroistoka preko priobalnih gorskih lanaca na istočnoj obali Jadranskog mora. Prostorno i vremenski je bura vrlo promjenjiva. Češće se javlja zimi kada može potrajati i do nekoliko dana. Najčešće na Jadran bura donosi hladan i suh zrak. Usrednjena satna vrijednost brzine puhanja bure od 10 do 30 m s<sup>-1</sup> je manje značajna od udara bure koji mogu dosegnuti brzinu nekoliko puta veću od usrednjene brzine, čak do 70 m s<sup>-1</sup>. Sukladno definiciji Svjetske meteorološke organizacije udar vjetra je maksimalna vrijednost 3-s klizne usrednjene vrijednosti brzine vjetra u 10-min periodu ([https://space.oscar.wmo.int/variables/view/wind\\_gust](https://space.oscar.wmo.int/variables/view/wind_gust)). Bura bitno utječe na život ljudi i brojna područja društvenih djelatnosti, posebice promet. Budući da značajke različitih tipova zavjetrinskog vjetra, a posebno bure, trenutno nisu poznate na način da budu izravno primjenjive prilikom projektiranja inženjerskih konstrukcija, potrebno je analizirati njihove karakteristike i prikazati ih u obliku pogodnom za inženjersku primjenu. Na taj način će biti omogućeno točno određivanje aerodinamičkog opterećenja bure i drugih tipova zavjetrinskog vjetra na konstrukcije i vozila. Na temelju mjerenja brzine vjetra na tri visine na lokaciji Pometeno brdo blizu Dugopolja u zaleđu Splita, u razdoblju od travnja 2010. do lipnja 2011. godine su analizirani vertikalni profili brzine puhanja bure kao i vremenski nizovi intenziteta turbulencije, Reynoldsovog smičnog naprezanja, integralnih duljinskih mjera turbulencije i ostalih relevantnih parametara. Vrijednosti postignute analizom navedenih parametara su uspoređene s odgovarajućim preporučenim vrijednostima danim u mjerodavnim inženjerskim međunarodnim normama i standardima (npr. ESDU 85020, 1985; ISO 4354, 1997; HRN EN 1991 Eurocode 1 2005; ASCE 7-05, 2006; AIJ, 2006). Također je analiziran i spektar gustoće snage fluktuacija brzine puhanja bure i termička stabilnost prizemnog sloja atmosfere za vrijeme trajanja pojedinih epizoda bure. Zbog snažnog mehaničkog miješanja strujanja zraka, bura je približno neutralno termički stratificirana. Rezultati analize epizoda bure ukazuju na činjenicu da se usrednjene vrijednosti puhanja bure podudaraju s empirijskim zakonom potencije i logaritamskim zakonom. Sa smanjenjem brzine vjetra dolazi do porasta eksponenta zakona potencije i aerodinamičke duljine hrapavosti tla kao i smanjenja brzine trenja što ukazuje na profil brzine tipičan za urbana područja pri manjim brzinama vjetra i profil brzine tipičan za ruralna područja pri većim brzinama vjetra. Iznos perioda usrednjavanja ne utječe na usrednjenu vrijednost brzine trenja, medijan i usrednjenu vrijednost eksponenta zakona potencije. Usrednjene vrijednosti aerodinamičke duljine hrapavosti tla se značajno razlikuju za različite periode usrednjavanja dok robusniji medijan

nema te karakteristike. Vrijednosti intenziteta turbulencije i lateralne duljinske mjere turbulencije se podudaraju s vrijednostima preporučenim u međunarodnoj normi ESDU 85020 (1985). Longitudinalna i vertikalna komponenta duljinskih mjera turbulencije, Reynoldsovo smično naprezanje, i spektar gustoće snage fluktuacija bure svih triju komponenti brzina značajno odstupaju od vrijednosti preporučenih u ESDU 85020 (1985). Preporučene vrijednosti u različitim normama i standardima su zakonski propisane vrijednosti koje je nužno koristiti pri projektiranju inženjerskih konstrukcija s ciljem postizanja aerodinamičke stabilnosti konstrukcija. Budući da diljem svijeta postoje različiti zavjetrinski vjetrovi slični buri, rezultati postignuti u okviru ovog doktorskog rada će biti relevantni i primjenjivi diljem svijeta.

**Ključne riječi:** bura, profil brzine, intenzitet turbulencije, Reynoldsovo smično naprezanje, duljinska mjera turbulencije, spektar gustoće snage fluktuacija strujanja zraka, terenska mjerenja

## EXTENDED ABSTRACT

### Introduction

Bora is a strong, temporally and spatially transient downslope wind. Its mean wind velocities rarely exceed  $30 \text{ m s}^{-1}$ , while one of Bora main characteristics is the gustiness when the wind velocity may reach up to five times the mean wind velocity, up to  $69 \text{ m s}^{-1}$  (e.g., Bajić and Peroš, 2005). Bora is more common in winter when it can last for several days, (e.g., Poje, 1992). It is more frequent at the eastern Adriatic and weakens seaward from the shore in a way that it is rarely stormy over the western Adriatic (e.g., Grisogono and Belušić, 2009). Depending on the triggering system, Bora can be cyclonic, bringing clouds with a high possibility for precipitation, anticyclonic, accompanied with clear weather, or frontal (e.g., Jurčec and Visković, 1994). Previous meteorological and geophysical studies laid groundwork regarding Bora large- and mesoscale motions, but further research is still required to fully understand and resolve Bora turbulence in a form usable for engineers. Bora is characteristic for the eastern Adriatic Coast but also for other dynamically similar places around the world thus making the Bora research globally applicable, (e.g., Jurčec, 1981).

For example, Bora affects lives of people and may create significant problems to traffic and engineering structures (e.g., Kozmar et al., 2014, 2015). Due to Bora, ferry traffic among the coastal ports and the islands usually stops, major roads and highways remain closed to traffic for several days. Bora can cause vehicles to roll over or slide away from the road, blow off roofs and building façades. It can damage cable-stayed bridges as well. For example, the Dubrovnik cable-stayed bridge was considerably damaged in several severe Bora episodes in 2005 and 2006. Wind turbines cannot operate during strong Bora events because they experience structural loading considerably different than the wind turbines in other areas without Bora. Bora blows down the trees, causing larger areas or even entire counties to lose electricity due to collapsing poles. There are not many records of building collapsing due to the severe Bora wind because buildings in coastal Croatia are generally low-rise and made of concrete that makes them not very prone to wind effects. In the summer, wildfires are significantly enhanced when Bora blows. For these reasons, further research is still needed to fully elucidate Bora characteristics in a form useful to engineers studying wind loads on structures. Therefore, an analysis of vertical wind profiles, time series of turbulence intensity, Reynolds shear stress, turbulence length scales, power spectral density and other relevant parameters, was carried out

and the results were compared to international standards. Furthermore, velocity power spectra and thermal stratification of the low-level atmosphere during Bora was analysed.

## **Methodology**

The measured data considered in this study were obtained from April 2010 until June 2011 at the meteorological tower on the Pometeno brdo (43°36'28,9"N and 16°28'37,4"E) in the hinterland of Split, Croatia on the lee side of the central Dinaric Alps. This rather long measurement period allows for making quite robust and reliable conclusions. Northern, eastern and vertical wind velocity components as well as the ultrasonic temperature were measured using ultrasonic anemometers at the sampling frequency of 5 Hz. That frequency was at the time the finest sampling rate ever applied to study Bora turbulence characteristics. Anemometers were mounted on a 60 m high meteorological tower at 10, 22 and 40 m heights placed along the main Bora direction. The vegetation surrounding the measurement site is mostly shrubs and bushes lower than 3 m and this area is known for frequent and strong Bora occurrences (e.g., Makjanić, 1978, Jurčec, 1981).

Prior to the analysis of the measured data, it is necessary to check the data quality and remove the outliers (e.g., Pandžić, 2002). Afterwards, the suspicious data that was removed (rather small amount less than approximately 0,004 % of the total dataset), this missing portion of the data was linearly interpolated, and Bora episodes were accordingly selected. A data set is considered as one Bora episode if the wind direction is from the northeast with negative longitudinal and lateral wind velocity components and if these conditions lasted continuously for a minimum of three hours.

During 18 months, the period in which the measurements were carried out, there were in total 296 Bora episodes that lasted from a few hours up to 127 hours. In total, 119 Bora episodes lasting longer than ten hours were selected and analysed. As expected, the wintertime Bora episodes generally last longer and have larger mean and maximum wind velocities than the summertime episodes, in agreement with Enger and Grisogono (1998).

Initial calculations and analyses were based on one summer Bora episode that lasted a total of 62 h between 24 and 27 July 2010 (Magjarević et al., 2011). During this period, the wind was relatively strong and long-lasting with mean hourly values of wind velocities above 15 m

$\text{s}^{-1}$ . To check whether the trends obtained for this summer episode are valid for other 118 analysed Bora episodes, the same analyses were performed for each individual Bora occurrence. The studied parameters include thermal stratification, the mean Bora wind velocity, turbulence intensity, Reynolds shear stress, turbulence length scales and velocity power spectra.

To investigate the applicability of the power- and logarithmic laws on Bora mean wind velocity profiles, a suitable coordinate system was adopted with the  $x$ -axis aligned along the mean wind direction. Therefore, the original data for the two horizontal velocity components were adjusted to this new coordinate system.

To test the data sensitivity to the choice of the time averaging period, the time-averaged wind velocity for the summertime Bora episode was calculated using moving average with four different time averaging periods. Periods of 5 min, 8 min, 17 min and 20 min were selected because it appears that, for this particular episode, the quasi-periodic Bora pulsations occur at the time period of about 8 min and the time period of  $17 \pm 3$  min represents a suitable turbulence averaging scale - the scale that separates turbulence from the mean flows at large scales (Magjarević et al., 2011). The analysis for the remaining 118 Bora episodes was accordingly performed using moving average with the time averaging period of 17 min.

Thermal stratification is commonly described using the dimensionless stability parameter  $\zeta$  (e.g., Stull, 1988). Positive  $\zeta$  implies statically stable, negative  $\zeta$  implies statically unstable and  $\zeta$  equal to zero implies statically neutral thermal stratification.

In the past, the power law proposed by Hellman (1916) proved to represent well the mean wind velocity profile throughout the entire atmospheric boundary layer, while the logarithmic law (e.g., Thuillier and Lappe, 1964), is considered valid within the surface layer. While it is hypothesized that a typical Bora surface layer is almost always near a neutral stratification, it is reasonable to ignore the thermal stability correction term in the logarithmic law and use the simplified expression in further analysis.

The applicability of the power law on the Bora wind velocity profile is analysed by calculating the power-law exponent,  $\alpha$ , and subsequently fitting the power law to the mean wind velocity profile that comprises of measured data at three studied heights. In particular, the time-averaged mean wind velocities in the  $x$ -direction at three levels are normalized using the time-



averaged mean wind velocity in the  $x$ -direction at 40 m height. To test the logarithmic law suitability for the mean Bora wind velocity profile, friction velocity,  $u_*$ , and aerodynamic surface roughness length,  $z_0$ , were calculated in two different ways, i.e., by data adjustment to the logarithmic law, and by directly applying the logarithmic law to a layer between 10 m and 40 m (Lepri et al., 2014, 2015). Turbulence intensity is defined as the root-mean-square of the fluctuating velocity components normalized with the time-averaged wind velocity (e.g., Simiu and Scanlan, 1996). Reynolds shear stress was calculated by using the fluctuating velocity correlations. The integral length scales of turbulence in the  $x$ -direction related to  $u'$ ,  $v'$ ,  $w'$  fluctuations were calculated using autocorrelation functions and assuming the validity of the Taylor frozen turbulence hypothesis (e.g., ESDU 74030, 1976). To remove the long-wave meandering from the time history prior to calculating Bora turbulence parameters, the moving average was removed from the velocity time history because this long-wave meandering is not considered to be a part of Bora turbulence. The power spectral density of longitudinal, lateral and vertical Bora velocity fluctuations on all three height levels were calculated using the fast Fourier transform (FFT) (e.g., Stull, 1988). The results obtained for turbulence intensity, Reynolds shear stress, turbulence length scales and power spectrum densities were compared with values recommended in major international wind engineering standards and codes.

## **Results and concluding remarks**

Due to strong mechanical mixing, Bora is near-neutral thermally stratified. The differences in day to night trends are negligible for all parameters considered in this study (Lepri et al., 2017).

Trends in the power-law exponent  $\alpha$ , friction velocity,  $u_*$ , and aerodynamic surface roughness length,  $z_0$ , were studied dependent on the mean Bora wind velocity. For the first time, it was established that the observed profiles of the mean wind velocity along the dominant Bora direction agree well with the power law and logarithmic law approximations. The logarithmic law and the power law fit the measured data better when performing the analysis using the median rather than using the arithmetic mean wind velocity due to a drifting of the mean aerodynamic surface roughness length during the recording time. This indicates that a more robust median may be a more suitable parameter to determine the aerodynamic surface roughness length than the arithmetic mean value. For the friction velocity, the arithmetic mean

proved to be independent of the time-averaging period length, while for the power-law exponent neither the arithmetic mean nor the median are influenced by the time-averaging period.

Another interesting feature is a decrease in  $\alpha$  and  $z_0$  and an increase in  $u_*$  with increasing Bora mean wind velocity, and vice versa. This indicates an urban-like velocity profile for smaller wind velocities and a rural-like velocity profile for larger wind velocities, which is due to a stronger increase in absolute velocity at each of the heights observed as compared to the respective velocity gradient (difference in mean wind velocity among two different heights), (Lepri et al., 2014). Variations in velocity profiles at the same site during different wind periods are important to be noted because in the engineering community it has been commonly adopted that the aerodynamic characteristics at a particular site remain the same during various wind regimes.

For the first time, Reynolds shear stress during Bora is assessed directly from suitable data sets. The observed values for turbulence intensity and Reynolds shear stress remain within the same range during the time record if the mean wind velocities exceed  $5 \text{ m s}^{-1}$ . When the mean wind velocities are lower than  $5 \text{ m s}^{-1}$ , the spread of these respective values increases considerably. This means that the wind velocity of  $\sim 5 \text{ m s}^{-1}$  may be considered as the critical velocity for Bora. Turbulence intensity, unlike Reynolds shear stress, agrees well with the values recommended in international standards for the respective terrain type. Turbulence length scales increase with increasing mean wind velocity and vice versa. With increasing height from the ground, turbulence intensity and absolute Reynolds shear stress decrease, while turbulence length scales increase, all in agreement with characteristics of the typical atmospheric boundary layer. Longitudinal turbulence length scales generally agree well with the values recommended in international standards for the respective terrain type, while turbulence length scales related to the lateral and vertical velocity fluctuations are much larger than the standard values. The choice of the time-averaging period proved not to influence the observed trends, while the median and arithmetic mean values are nearly the same for all three parameters.

Spectral distribution of Bora turbulence kinetic energy differs from ESDU 85020 (1985) in a way that it is distributed across a wider range of frequencies compared to ESDU 85020 (1985). Bora spectrum is flatter, without a distinct peak, and there is a strong energy content at high frequencies.

To understand the real importance of the Bora wind characterization from the engineering point of view, further work is still required with respect to Bora turbulence for other terrain types, seasons and elevations from the ground, as well as the extreme value distributions in comparison with cyclonic events.

**Keywords:** Bora, vertical wind profile, turbulence intensity, Reynolds shear stress, turbulence length scale, power spectral density of wind pulsations, field measurements

## POPIS SIMBOLA

$C_{exp}$	Faktor izloženosti prema ISO 4354 (1997)
$C_{exp,mod}$	Modificirani faktor izloženosti za brdoviti teren prema ISO 4354 (1997)
$C_{exp,z}$	Faktor izloženosti na visini $z$ prema ISO 4354 (1997)
$C_1 C_2 C_3$	Konstante prema AIJ (2006)
$c$	Konstanta ovisna o izloženosti terena prema ASCE 7-05 (2006)
$c_0$	Faktor vertikalne razvedenosti terena prema HRN EN 1991-1-4 (2012)
$c_{dir}$	Faktor smjera prema HRN EN 1991-1-4 (2012)
$c_{season}$	Faktor godišnjeg doba prema HRN EN 1991-1-4 (2012)
$d$	Visina pomaka (eng. <i>displacement height</i> )
$E_{gI}$	Faktor topografije prema AIJ (2006)
$E_g$	Faktor topografije koji opisuje promjenu usrednjene brzine vjetra kada vjetar okomito nastrujava preko strmine ili orografije oblika grebena prema AIJ (2006)
$E_I$	Faktor topografije za standardnu devijaciju fluktuacija brzine vjetra prema AIJ (2006)
$f$	Coriolisov parametar Frekvencija prema AIJ (2006)
$f_L(z, n)$	Bezdimenzijska frekvencija prema HRN EN 1991-1-4 (2012)
$g$	Ubrzanje sile teže
$H_s$	Visina orografije prema AIJ (2006)
$h$	Visina atmosferskog graničnog sloja
$h$	Visina strukture prema ISO 4354 (1997)
$I_u, I_v, I_w$	Intenzitet turbulencije u $x$ -, $y$ - i $z$ -smjeru
$I_u^*$	Normirani intenzitet turbulencije prema ISO 4354 (1997)
$I_{tz}$	Intenzitet turbulencije na visini $z$ iznad ravnog terena za različite kategorije terena prema AIJ (2006)

$I_z$	Intenzitet turbulencije na visini $z$ prema AIJ (2006)
$I_{\bar{z}}$	Intenzitet turbulencije na visini ekvivalentne visine strukture prema ASCE 7-05 (2006)
$k_I$	Faktor turbulencije prema HRN EN 1991-1-4 (2012)
$k_{l,z_0}$	Faktor skale logaritamskog zakona prema ISO 4354 (1997)
$k_r$	Faktor terena prema HRN EN 1991-1-4 (2012)
$k_{red}$	Faktor redukcije prema ISO 4354 (1997)
$k_{\rho,z_0}$	Faktor skale zakona potencije prema ISO 4354 (1997)
$L$	Obukhovljeva duljina
	Duljinska mjera turbulencije za fluktuirajuće komponente vjetra u $x$ -smjeru prema AIJ (2006)
${}^xL_u', {}^xL_v', {}^xL_w$	Duljinske mjere turbulencije za fluktuirajuće komponente vjetra u $x$ -, $y$ - i $z$ -smjeru
$L_H$	Visina do polovice visine orografije prema ISO 4354 (1997)
$L_s$	Horizontalna udaljenost od vrha orografije do polovice visine orografije prema AIJ (2006)
$L_t$	Referentna duljinska skala prema HRN EN 1991-1-4 (2012)
$L(z)$	Duljinska mjera turbulencije
$L_{\bar{z}}$	Duljinska mjera turbulencije na visini ekvivalentne visine strukture prema ASCE 7-05 (2006)
$\ell$	Konstanta ovisna o karakteristikama terena prema ASCE 7-05 (2006)
$n$	Frekvencija prema ESDU 85020 (1985) Vlastita frekvencija konstrukcija prema HRN EN 1991-1-4 (2012)
min	Minuta
$p$	Parametar koji se koristi za izračun intenziteta turbulencije prema ESDU 85020 (1985)
$R_{ii}$	Funkcija autokorelacije
$S_L(z,n)$	Funkcija spektralne gustoće snage prema HRN EN 1991-1-4 (2012)
$S_{u'u'}, S_{v'v'}, S_{w'w'}$	Spektar gustoće snage fluktuirajućih komponenti vjetra u $x$ -, $y$ - i $z$ -smjeru
$S_V(z,n)$	Jednostrana varijanca spektra prema HRN EN 1991-1-4 (2012)

$\Delta S_{t,max}$	Relativni „ <i>speed up</i> “ faktor pri površini vrha orografije prema ISO 4354 (1997)
$T_i$	Vremenska skala turbulencije
$U$	Usrednjena brzina vjetra prema prema AIJ (2006)
$U_z$	Usrednjena vrijednost brzine vjetra na visini $z$ prema AIJ (2006)
$U_{Z0}$	Usrednjena vrijednost brzine vjetra na visini $Z_0$ prema AIJ (2006)
$u, v$ i $w$	Apsolutna brzina vjetra u $x$ -, $y$ - i $z$ - smjeru
$\bar{u}, \bar{v}$ i $\bar{w}$	Vremenski usrednjene brzine vjetra u $x$ -, $y$ - i $z$ - smjeru
$u', v'$ i $w'$	Fluktuirajuće komponente brzine vjetra u $x$ -, $y$ - i $z$ - smjeru
$\overline{u'v'}, \overline{v'w'}, \overline{u'w'}$	Kovarijance fluktuirajuće komponente brzine vjetra u $x$ -, $y$ - i $z$ - smjeru
$u_*$	Brzina trenja
$\bar{u}_{ref}$	Vremenski usrednjena brzina vjetra u $x$ -smjeru na referentnoj visini $z_{ref}$
$\bar{u}_z$	Vremenski usrednjena brzina vjetra u $x$ -smjeru na visini $z$
$v_b$	Osnovna brzina vjetra prema HRN EN 1991-1-4 (2012)
$v_{b,o}$	Temeljna vrijednost osnovne brzine vjetra prema HRN EN 1991-1-4 (2012)
$v_m$	Usrednjena vrijednost brzine prema HRN EN 1991-1-4 (2012)
$V_{max10}$	Maksimalna brzina vjetra na visini 10 m
$V_{max22}$	Maksimalna brzina vjetra na visini 22 m
$V_{max40}$	Maksimalna brzina vjetra na visini 40 m
$V_{sr10}$	Usrednjena vrijednost brzine vjetra na visini 10 m
$V_{sr22}$	Usrednjena vrijednost brzine vjetra na visini 22 m
$V_{sr40}$	Usrednjena vrijednost brzine vjetra na visini 40 m
$\bar{V}_z$	Ukupna usrednjena vrijednost brzine vjetra
$V_z$	Satna usrednjena vrijednost brzine vjetra na visini $z$
$V_{10r}$	Referentna satna usrednjena vrijednost brzine vjetra na visini 10 m za teren karakteriziran s $z_0 = 0,03$ m

$\overline{w'\theta'}$	Lokalni vertikalni kinematički tok topline
$X_s$	Udaljenost od vrha orografije do gradilišta prema AIJ (2006)
$x, y, z$	Kartezijeve koordinate s $x$ - osi u smjeru usrednjene vrijednosti brzine vjetra
$Z_0, z$	Visina
$Z_b, Z_G$	Konstanta ovisna o kategoriji terena prema AIJ (2006)
$\bar{z}$	Ekvivalentna visina strukture prema ASCE 7-05 (2006)
$z_0$	Aerodinamička duljina hrapavosti površine
$z_{\max}$	Maksimalna visina
$z_{\min}$	Minimalna visina
$z_{\text{ref}}$	Referentna visina
$\bar{\theta}$	Usrednjena vrijednost virtualne potencijalne temperature
$\theta_s$	Nagib orografije prema AIJ (2006)
$\alpha$	EkspONENT zakona potencije
	Koeficijent smanjenja „speed-up-a“ s visinom prema ISO 4354 (1997)
$\beta$	EkspONENT zakona potencije prema ISO 4354 (1997)
$\delta$	Visina strukture prema ASCE 7-05 (2006)
$\kappa$	Von Kármánova konstanta
$\bar{\epsilon}$	Konstanta ovisna o karakteristikama terena prema ASCE 7-05 (2006)
$\zeta$	Parametar termičke stabilnosti
$\eta$	Parametar koji se koristi za izračun intenziteta turbulencije prema ESDU 85020 (1985)
$\rho$	Gustoća zraka
$\sigma_v$	Standardna devijacija fluktuacije brzine vjetra prema HRN EN 1991-1-4 (2012)
$\sigma_{u'}, \sigma_{v'}, \sigma_{w'}$	Standardna devijacija fluktuirajuće komponente vjetra u $x$ -, $y$ - i $z$ - smjeru na visini $z$
$\sigma_u$	Standardna devijacija fluktuirajuće komponente vjetra u $x$ -smjeru prema AIJ (2006)

$\tau$	Vremenski period
$\tau_z$	Smično naprezanje prema ESDU 85020 (1985)
$\psi$	Faktor korekcije termičke stabilnosti u logaritamskom zakonu

### POPIS KRATICA

AGS	Atmosferski granični sloj
AIJ	Architectural Institute of Japan
ALPEX	Alpine Experiment
ASCE	American Society of Civil Engineers
ESDU	Engineering Science Data Unit
ISO	International Standard Organization
MAP	Mesoscale Alpine Programme
TKE	Kinetička energija turbulencije



## SADRŽAJ:

POPIS SIMBOLA .....	ix
POPIS KRATICA .....	xiii
1 UVOD .....	1
1.1 Motivacija i hipoteza istraživanja.....	1
1.2 Pregled dosadašnjeg istraživanja bure .....	2
1.3 Cilj istraživanja.....	7
2 OSNOVE.....	9
2.1 Atmosferski granični sloj.....	9
2.2 Karakteristike strujanja u donjim slojevima atmosfere .....	10
2.3 Značajke vjetra preporučene međunarodnim normama .....	13
3 METODOLOGIJA .....	30
3.1 Mjerna oprema i postupak mjerenja .....	30
3.2 Obrada i analiza rezultata mjerenja .....	32
3.3 Zabilježene epizode bure .....	35
4 REZULTATI I DISKUSIJA .....	39
4.1 Termička stratifikacija niže troposfere tijekom bure.....	40
4.2 Vertikalni profil usrednjene vrijednosti brzine vjetra.....	45
4.3 Intenzitet turbulencije .....	62
4.4 Reynoldsovo smično naprezanje .....	78
4.5 Duljinske mjere turbulencije .....	91
4.6 Spektralna analiza.....	105
5 ZAKLJUČAK .....	108
LITERATURA .....	111
ŽIVOTOPIS .....	121

# 1 UVOD

## 1.1 Motivacija i hipoteza istraživanja

Značajke različitih tipova zavjetrinskog vjetra u ovom trenutku nisu poznate na način da se mogu direktno primjenjivati prilikom projektiranja inženjerskih konstrukcija. Ovo se posebno odnosi na buru. Stoga je potrebno analizirati značajke bure i drugih tipova zavjetrinskog vjetra u prizemnom sloju atmosfere iznad brdovitog terena i prikazati ih u obliku pogodnom za inženjersku primjenu s ciljem omogućavanja točnog određivanja aerodinamičkih opterećenja bure i drugih tipova zavjetrinskog vjetra na konstrukcije i vozila. Osim toga, točan početak, detaljan razvoj i kraj strujanja planinskog i zavjetrinskog vjetra je teško predvidjeti.

Na istočnoj obali Jadrana bura se pojavljuje od Trsta, preko priobalnih planinskih masiva, do Dubrovnika i južnije. Svojom pojavom bura značajno utječe na život ljudi te može stvoriti značajne probleme u prometu i različitim konstrukcijama, posebno na mjestima gdje se pojavljuje vrlo često. Uslijed bure prekida se trajektni promet između luka na kopnu i otoka, a ceste i autoceste ostaju zatvorene za promet i nekoliko dana. Bura može uzrokovati prevrtanje ili otklizavanje vozila s ceste, štete na krovovima i pročeljima zgrada, visećim i ovješanim mostovima. Na primjer, Most dr. Franje Tuđmana u Dubrovniku bio je znatno oštećen tijekom nekoliko orkanskih epizoda bure 2005. i 2006. godine. Vjetroturbine prestaju s radom kada bura postane olujna (ako su brzine veće od  $17 \text{ m s}^{-1}$  prema Beaufortovoj ljestvici) ili orkanska (ako su brzine veće od  $24,5 \text{ m s}^{-1}$  prema Beaufortovoj ljestvici), pri čemu su strukturna opterećenja vjetroturbina drugačija nego u područjima bez bure. Olujna i orkanska bura često ruši drveće, a može dovesti i do urušavanja dalekovoda zbog čega veća područja, pa čak i cijele županije, mogu određeno vrijeme biti bez električne energije. Zgrade u priobalnoj Hrvatskoj su općenito niske i izgrađene od betona te rijetko trpe štete od udara olujne ili orkanske bure. Šumski požari su često potaknuti burom zbog čega se izrazito brzo šire i teško kontroliraju (npr. Čavlina Tomašević i sur., 2022). Zbog svega navedenog potrebno je provoditi detaljna i opsežna istraživanja koja će definirati značajke bure u obliku prihvatljivom za inženjere koji se bave proučavanjem djelovanja vjetra na inženjerske konstrukcije i vozila. Nadalje, rezultate ovih istraživanja bit će moguće primijeniti i na druge tipove zavjetrinskog olujnog vjetra kao što je na primjer foehn, (npr., Mayr i sur., 2018).

Hipoteza ovog rada jest da međunarodne norme i standardi (npr. ESDU 85020, 1985; ISO 4354, 1997; HRN EN 1991 Eurocode 1, 2005; ASCE 7-05, 2006; AIJ, 2006) ne daju točne preporuke za proračune vertikalnog profila brzine puhanja bure, intenziteta turbulencije, Reynoldsovog smičnog naprezanja, integralnih duljinskih mjera turbulencije i spektra gustoće snage fluktuacija bure s obzirom na značajke atmosferske turbulencije u prizemnom sloju atmosfere. Nedostatak odgovarajućih informacija u međunarodnim normama onemogućava točan proračun aerodinamičkih opterećenja na konstrukcije i vozila pri djelovanju zavjetrinskog vjetra što može uzrokovati značajna oštećenja konstrukcija i vozila.

Iako je ovo istraživanje provedeno na podacima vezanim za buru na Jadranskoj obali, vjetar vrlo sličnih značajki se pojavljuje i u drugim dijelovima svijeta što istraživanje bure čini globalno primjenjivim.

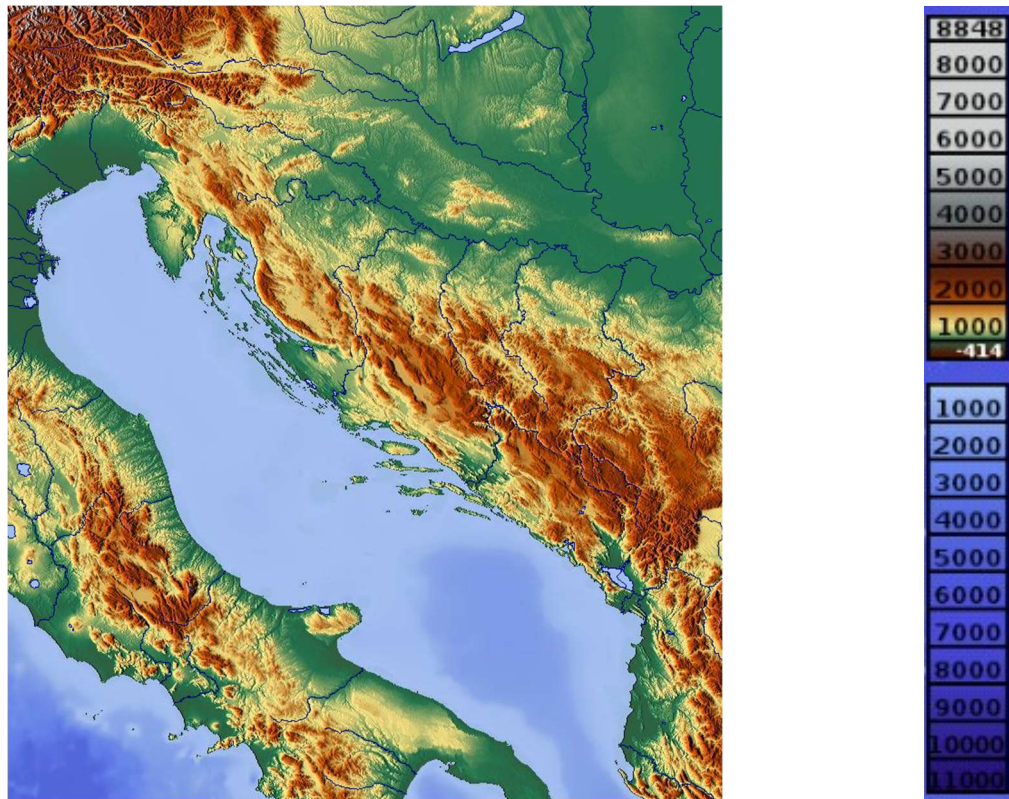
## **1.2 Pregled dosadašnjeg istraživanja bure**

Bura je izrazito snažan, vremenski i prostorno promjenjiv, najčešće suhi zavjetrinski vjetar koji puše sa sjeveroistoka preko priobalnih gorskih lanaca na istočnoj obali Jadranskog mora od Trsta do Dubrovnika i južnije (npr., Yoshino, 1976; Makjanić, 1978; Bajić, 1988, 1989; Tutiš, 1988; Vučetić, 1991; Belušić i Klaić, 2004, 2006). Prostorno-vremenska statistička analiza pokazuje da učestalost pojave bure na istočnoj obali Jadranskog mora opada od sjeverozapada do jugoistoka (npr., Poje, 1992), a njezina snaga slabi od obale prema moru na način da je rijetko olujna na zapadnoj obali Jadranskog mora (npr., Enger i Grisogono, 1998). Usrednjene vrijednosti brzine bure su rijetko veće od  $15 \text{ m s}^{-1}$ , a glavna značajka je mahovitost, pri čemu trenutne brzine vjetra mogu biti bitno veće od usrednjene brzine (npr., Petkovšek, 1987; Belušić i Klaić, 2004, 2006; Grisogono i Belušić, 2009; Večenaj i sur., 2010; Belušić i sur., 2013). Jedna epizoda bure može trajati od nekoliko sati do nekoliko dana, a duže epizode bure učestalije su u zimskom razdoblju. Najjači udar bure brzine  $69 \text{ m s}^{-1}$  izmjeren je 21. prosinca 1998. godine na mjernoj postaji Maslenički most (npr., Bajić i Peroš, 2005).

Bura značajno utječe na promet i konstrukcije (npr., Kozmar i sur., 2012 a,b), posebno na lokacijama na kojima se često pojavljuje. Jedna takva karakteristična lokacija je grad Senj gdje bura u prosjeku puše 177 dana godišnje (npr., Belušić i Klaić, 2004).

Zbog njene značajne prostorne varijabilnosti, ne postoji stroga definicija bure (npr. Poje, 1992; Horvath i sur., 2009; Večenaj i sur., 2012). Međutim, određeni događaj može se smatrati

epizodom bure, ako vremenski niz horizontalnih komponenti brzine ima azimut iz prvog kvadranta i traje duže od 3 h s usrednjenim vrijednostima brzina vjetra većim ili jednakim  $5 \text{ m s}^{-1}$ . Ako se radi o jakoj do olujnoj buri tada su standardne devijacije brzine vjetra usporedive s odgovarajućom brzinom vjetra (npr., Belušić i Klaić, 2006), no isto ne mora biti slučaj kod slabe do umjerene bure (Večenaj, 2012). Uglavnom, to nije zahtjev za klasifikaciju bure, već nerjetko popratno opažanje.



Slika 1: Jadransko more s Dinaridima na istočnoj obali Jadrana. Visina orografije u metrima. (Slika preuzeta s <https://maps-for-free.com/>).

Dugotrajna bura, koja može trajati i dulje od tjedan dana (npr. Golem i sur., 2022), najčešće je povezana s postojanjem ciklone iznad područja Jadranskog mora. Ako postoji i centar polja visokog tlaka iznad središnje ili istočne Europe, tada ciklona povlači kontinentalni zrak iz donje troposfere preko priobalnih planinskih lanaca (npr., Jurčec, 1981; Heimann, 2001; Horvath i Ivančan-Picek, 2009; Belušić i sur., 2013). Drugi slučaj nastanka bure je anticiklona koja potiskuje zrak iznad Panonske nizine i središnje Europe preko priobalnih planina prema Jadranskom moru. Ovisno o intenzitetu i evoluciji ciklogeneze i njenoj sinkronizaciji s tokom zraka iz više troposfere nastaje plitka ili duboka bura (npr., Grisogono i Belušić, 2009). Plitka bura nastaje ako joj tok ostane ograničen u donjoj troposferi, gdje bitnu ulogu ima inverzija na

sinoptičkoj skali (npr., Smith, 1987). Prolazak hladne fronte preko Jadrana može uzrokovati nastanak bure kraćeg trajanja.

Ovisno o baričkom sustavu koji ju pokreće, bura može biti ciklonalna, anticiklonalna ili frontalna. Ciklonalna bura nastaje u hladnom sektoru ciklone, kada duboka ciklona zahvaća dio Sredozemlja. Praćena je oblacima uz veliku vjerojatnost za pojavu oborine. Anticiklonalna bura nastaje uslijed dominantnog utjecaja polja visokog tlaka iznad većeg dijela Europe. Traje relativno dugo te donosi suho i sunčano vrijeme. Frontalna bura povezana je s prolaskom hladnog zraka iza hladne fronte. Njene glavne karakteristike su brzi nastanak i kratko trajanje (npr., Jurčec i Visković, 1994).

Ciklonalna i anticiklonalna bura može biti duboka ili plitka ovisno o debljini sinoptičkog toka preko planinskih vrhova (Kuzmić i sur., 2015). Ciklonalne bure su većinom plitke, dok je duboka bura najčešće anticiklonalna. Budući da snažne anticiklone mogu trajati danima, nije neobično niti da anticiklonalna bura potraje i preko tjedan dana. Nije dokazano da su razlike u značajkama bure na mikroskali povezane s različitim tipovima bure, već ovise uglavnom o usrednjenosti vrijednosti brzine vjetra (Šoljan i sur., 2018).

Napredak u globalnom razumijevanju sustava koji pokreće nastanak olujne bure odvijao se istovremeno s razvojem naprednih mjernih uređaja i računalnih atmosferskih modela. Do ALPEX (Alpine Experiment) projekta (npr., Mahrt i Gamage, 1987), provedenog 1982. godine prevladavala je teorija o buri kao katabatičkom vjetru koji ubrzava niz padinu (npr., Yoshino, 1976; Jurčec, 1981). Ta teorija je pogodna za opis bure u početnoj ili krajnjoj fazi, dok se pojavljuje lokalno i nije olujna (npr., Grisogono i Belušić, 2009). No, činjenica je da jednostavni katabatički tokovi nemaju kapaciteta za generiranje vjetra usrednjenih brzina od približno  $\sim 20 \text{ m s}^{-1}$ . Budući da brzina katabatičkog vjetra ovisi o razlici potencijalnih temperatura, postizanje takvih brzina zahtijeva izraženi pad potencijalne temperature reda veličine od približno  $\sim 24 \text{ K}$ , (npr., Egger, 1990; Grisogono i Oerlemans, 2001). Nadalje, problem katabatičkog pristupa je i u premaloj visini iznad tla na kojoj je brzina katabatičkog vjetra maksimalna (npr., Grisogono i Belušić, 2009). Nakon uočavanja navedenih nedostataka katabatičke teorije bure, Klemp i Durran (1987) i Smith (1987) neovisno su pokazali da se jak tok bure vrlo dobro može aproksimirati nelinearnim hidrauličkim tokom bez značajne stratifikacije u području najvećih brzina vjetra. Naime, tada dolazi do snažne rezonancije između strujanja zraka i terena na način da lom valova i pripadno mehaničko miješanje zraka umanjuju učinke termičke stratifikacije u

blizini tla (npr., Smith i Sun, 1987; Bajić, 1991; Grisogono i Belušić, 2009). Trenutno je prihvaćena hidraulička teorija jake do olujne bure s orografskim lomom planinskih valova prilikom prelaska zraka iz subkritičnog strujanja na navjetrinskoj strani planine u superkritično strujanje na zavjetrinskoj strani, što je često popraćeno hidrauličkim skokom, (npr., Smith, 1985, 1987; Smith i Sun, 1987; Bajić, 1991; Enger i Grisogono, 1998; Gohm i sur., 2008; Grisogono i Belušić, 2009). Numerički mezoskalni atmosferski modeli uspješno reproduciraju osnovne značajke bure na mezoskali (npr., Enger i Grisogono, 1998; Klaić i sur., 2003; Grubišić, 2004; Belušić i sur., 2007; Horvath i sur., 2009, 2011; Telišman Prtenjak i Belušić, 2009), no kada se radi o značajkama bure na mikroskali, njihova uspješnost postaje upitna što dokazuje osjetljivost rezultata modela na izbor sheme parametrizacije turbulencije (npr., Grisogono i Belušić, 2009).

Trenutno u literaturi postoji relativno malo radova koji se bave turbulencijom bure. Glavni razlog je nedostatak odgovarajućih visokofrekventnih terenskih mjerenja brzine vjetra i temperature, npr. na meteorološkom tornju i mjerenja provedena zrakoplovom. U prethodnom razdoblju su provedena istraživanja na temelju visokofrekventnih mjerenja brzine vjetra i temperature na istočnoj obali Jadranskog mora.

U okviru projekta ALPEx (the Alpine Experiment, npr., Kuettner i O'Neill, 1981) i projekta MAP (Mesoscale Alpine Programme, npr., Bougeault i sur., 2001) su provedena visokofrekventna zrakoplovna mjerenja brzine vjetra i temperature. Na temelju podataka iz ALPEx programa, Mahrt i Gamage (1987) odredili su nekoliko tipova turbulencije bure. Grubišić (2004) je na temelju MAP podataka opisala mezoskalne značajke bure u ovisnosti o terenu s posebnim naglaskom na potencijalnu vrtložnost. Večenaj i sur. (2012) su na temelju MAP podataka zaključili da zbog jakog smicanja vjetra turbulencija u buri, daleko od orografije, uglavnom nastaje lokalno.

Detaljna mjerenja brzine vjetra in situ provedena su u Senju i Vratniku. Između prosinca 2001. i siječnja 2002., u Senju je šaličnim anemometrom čestine uzorkovanja 1 Hz izmjerena horizontalna komponenta brzine bure. Belušić i sur. (2004) izdvojili su 10 epizoda bure i promatrali pulsacije udara bure. Zaključili su da se pulsacije pojavljuju na skalama između 3 min i 11 min te da se mogu pojaviti i nestati više puta tijekom jedne epizode bure. Ista mjerenja koristili su Belušić i sur. (2006) za analizu turbulencije, gdje je turbulencija definirana kao varijabilnost brzine vjetra na vremenskoj skali između 2 s i 10 min. Vremenska skala od 2 s

odgovara Nyquistovoj frekvenciji. Pokazali su da je na skalama između 2 s i 1 min turbulencija generirana lokalno mehaničkim smicanjem pri tlu, dok na skalama između 1 min i 10 min u generiranju turbulencije mogu sudjelovati i submezoskalni procesi. Na skali u rasponu od 1 min do 10 min, odgovarajuća varijabilnost raste bez porasta usrednjene vrijednosti brzine vjetra. Zbog toga se za skale između 1 s i 1 min koristi pojam lokalna turbulencija, a za skale od 1 min do 10 min ne-lokalna turbulencija. Na temelju numeričkih simulacija, Belušić i sur. (2007) su istražili pulsacije udara bure u Senju s obzirom na Kelvin-Helmholtzovu nestabilnost (npr., Peltier i Scinocca, 1990).

Osim ovog mehanizma nastanka pulsacija udara bure, trenutno postoje još barem dva objašnjenja tj. mehanizma: trodimenzijske nestabilnosti toka kod pucanja planinskih valova (Clark i Farley, 1984), i nelinearni propagirajući zavjetrinski val (Clark i sur., 1994).

Belušić i sur. (2006) pokazali su da Taylorova hipoteza, koja je nužna za prijelaz iz vremenske u prostornu domenu, vrijedi samo za pojedine slučajeve. Preliminarno je pokazano da u slučaju lokalne turbulencije, kada su iz analize isključene pulsacije, vrijedi linearan odnos između standardne devijacije i usrednjene vrijednosti brzine vjetra, što je u skladu sa Stull (1988).

Belušić i Klaić (2006) su na temelju podataka mjerenja ultrasoničnim anemometrom u Senju ocijenili uspješnost numeričkog mezoskalnog modela MM5 pri rekonstrukciji odabranih epizoda bure. Pokazali su da vrijednost turbulentne kinetičke energije<sup>1</sup> (TKE) u buri može postići vrijednosti i do  $30 \text{ J kg}^{-1}$ , a Večenaj i sur. (2010) su procijenili disipaciju TKE bure.

Udari zavjetrinskih vjetrova se ponekad ponašaju kvaziperiodički (npr., Petkovšek, 1976, 1982, 1987; Rakovec, 1987; Neiman i sur., 1988), pri čemu su pulsacije bure uglavnom prisutne pri frekvencijama između 3 i 11 min (Belušić i sur., 2004, 2006, 2007). Pulsacije ne nastaju lokalno, tj. njihovo postojanje nije povezano s eventualnim lokalnim mehanizmima nastanka.

Zbog kompleksnosti terena središnjeg i južnog Jadrana, bura je većinom proučavana na sjevernom dijelu istočne obale Jadranskog mora (npr., Makjanić, 1970; Lukšić, 1975; Petkovšek, 1984; Jurčec, 1988, 1989; Bajić 1988, 1989; Tutiš, 1988; Vučetić 1988; Ivančan-

---

<sup>1</sup> Iako je ispravniji prijevod: kinetička energija turbulencije, zbog konzistencije s uvriježenom kraticom, TKE, što je na engleskom jeziku „*turbulence kinetic energy*“, bit će korištena kratica TKE.

Picek i Vučetić, 1990; Ivančan-Picek i Tutiš, 1996; Tudor i Ivatek-Šahdan, 2002; Grubišić 2004; Gohm i Mayr, 2005; Klaić i sur., 2009). Na sjevernom djelu obale, koji uključuje i sjeverni Velebit, manje je planskih vrhova, prijevoja, dolina i značajnih riječnih ušća koji utječu na dolazno strujanje zraka (npr., Grisogono i Belušić, 2009; Belušić i sur., 2013).

Budući da je bura na srednjem i južnom Jadranu slabija i manje učestala, uvjeti za izgradnju vjetroelektrana su povoljniji u odnosu na sjeverni Jadran. Energetski potencijal nekog područja moguće je istražiti na temelju istovremenih visokofrekventnih mjerenja na nekoliko visina. Terenska mjerenja te vrste provedena su od travnja 2010. do lipnja 2011. godine, i to na lokaciji Pometeno brdo u zaleđu Splita. Na ovim podacima Babić i sur. (2016) otkrili su postojanje energijskog procijepa (eng. *energy gap*) na skali od 15 minuta. Šoljan i sur. (2018) su, na temelju podataka dobivenih mjerenjem brzine vjetra i ultrasonične temperature u neposrednoj blizini Masleničkog mosta u razdoblju od listopada 2015. do veljače 2016. na tri visine s čestinom uzorkovanja od 20 Hz, potvrdili valjanost tada dostupnih rezultata prethodnih istraživanja bure na drugim lokacijama i za lokaciju Masleničkog mosta.

Iako je pojava bure uobičajena za istočnu obalu Jadranskog mora, dinamički slični vjetrovi su prisutni u brojnim drugim dijelovima svijeta, npr. u Novorossijsku i na obali Crnog mora podno Kavkaza, u zaljevu Tehuantepec na pacifičkoj obali Meksika gdje je vjetar poznat pod imenom Papagayos te u ravnici Kanto u Japanu - vjetar Oroshi ili Karakkaze (npr., Yoshino, 1976). Iz navedenog direktno proizlazi da je istraživanje bure u sklopu ovog rada globalno primjenjivo (npr., Lilly, 1978; Jurčec, 1981; Neiman i sur., 1988; Ágústsson i Ólafsson, 2007; Jackson i sur., 2013), pri čemu su utjecaji bure na okolinu donekle usporedivi s utjecajima ostalih vrsta jakog tranzijentnog vjetra (npr., Solari i sur., 2015).

### **1.3 Cilj istraživanja**

Ciljevi istraživanja obuhvaćaju značajke vertikalnih profila klizno usrednjenih vrijednosti brzine bure za različite periode usrednjavanja te vremenskih nizova intenziteta turbulencije, Reynoldsovog smičnog naprežanja i duljinskih mjera turbulencije, spektralne gustoće snage fluktuacija bure, termičke stratifikacije prizemnog sloja atmosfere tijekom bure u usporedbi s preporukama danim u relevantnim međunarodnim normama i standardima namijenjenim inženjerskim proračunima opterećenja vjetra na konstrukcije i vozila.

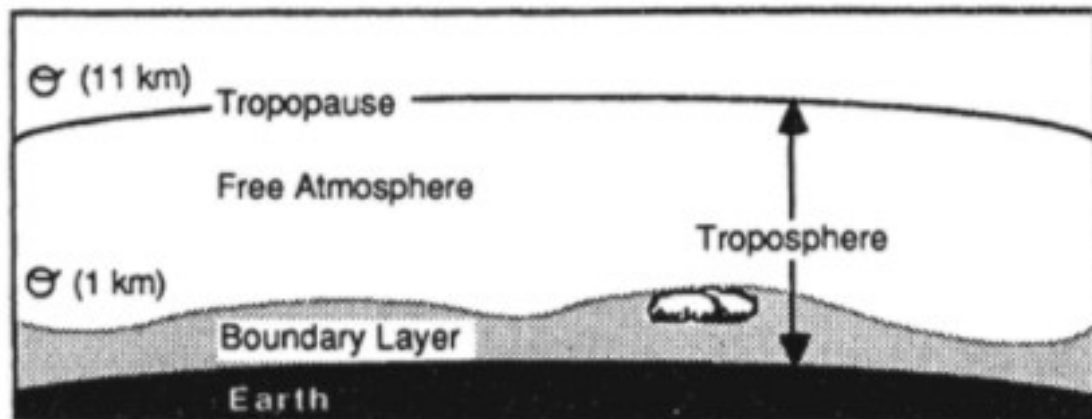


Budući da u navedenim normama i standardima trenutno ne postoje preporuke koje na zadovoljavajući način opisuju značajke zavjetrinskih vjetrova i planinskih oluja, rezultati prikazanog istraživanja omogućit će točan proračun djelovanja bure na konstrukcije i vozila, kao i stvaranje baze podataka za navedene međunarodne norme i standarde s obzirom na značajke turbulencije olujne i orkanske bure.

## 2 OSNOVE

### 2.1 Atmosferski granični sloj

Troposfera je najniži sloj atmosfere u blizini Zemljine površine. Dijeli se na atmosferski granični sloj (AGS) visine od nekoliko metara do nekoliko kilometara i slobodnu atmosferu iznad AGS-a, Slika 2.



Slika 2: Podjela troposfere na atmosferski granični sloj pri površini (sjenčano) i slobodnu atmosferu iznad toga. (slika preuzeta iz Stull, 1988)

Zemljina površina djeluje na atmosferu trenjem, izmjenom topline te transpiracijom i evaporacijom, što se odražava u značajkama AGS-a u trajanju od maksimalno jednog sata. U AGS-u općenito postoje tri podsloja: 1) viskozni podsloj visine približno 1 mm, 2) prizemni podsloj visine od približno 1 m do približno 100 m, i 3) sloj miješanja visine iznad približno 1 km (npr., Stull, 1988). Prizemni podsloj karakteriziraju približno konstantni ( $\pm 20\%$ ) turbulentni tokovi po visini, a dominantni vrtlozi najčešće rastu s udaljavanjem od tla. Sloj miješanja je uobičajeno najdeblji sloj AGS-a u kojemu vrtložno miješanje postiže maksimalni intenzitet, a vrtlozi koji u najvećoj mjeri doprinose miješanju se više ne povećavaju već su im dimenzije ograničene visinom prizemnog sloja i inverzijom iznad sloja miješanja (npr., Stull, 1988).

Razlika između AGS-a i slobodne atmosfere se može primijetiti u dnevnim amplitudama temperature koje su puno veće u AGS-u od onih u slobodnoj atmosferi. Razlog navedenog pojavi jest apsorpcija Sunčevog zračenja od tla, koja može iznositi i do 90%. Ovisno o količini Sunčevog zračenja, tlo se zagrijava ili hladi tj. predaje ili preuzima toplinu od AGS-a (npr., Stull, 1988).

## 2.2 Karakteristike strujanja u donjim slojevima atmosfere

Strujanje u AGS-u je klasificirano u tri kategorije: srednji vjetar, turbulencija i valovi. Srednji vjetar ima značajnu ulogu pri advekciji vlage, topline, impulsa gibanja i onečišćenja. Zbog trenja s površinom najmanje brzine vjetra su pri površini i rastu s visinom. Valovi su tipični za noćni granični sloj i značajno utječu na prijenos impulsa gibanja i energije. Dinamiku strujanja u AGS-u bitno uvjetuju viskoznost i turbulencija strujanja. Glavne značajke turbulentnog strujanja su česta nestacionarnost, difuzivni karakter, trodimenzionalnost, vrtložnost, veliki Reynoldsov broj i disipacija energije zbog čega je u jednadžbama strujanja zraka u AGS-u potrebno u obzir uzeti turbulentne komponente (npr., Stull, 1988).

Viskoznost i uvjet nepropusnosti tla kao čvrste stijenke, pri čemu je brzina na stijenci jednaka nuli, doprinose nastanku i održavanju malih turbulentnih vrtloga. Čak i relativno slab vjetar uzrokuje smicanje blizu tla koje doprinosi stvaranju vrtloga. Vrtlozi koji nastaju smicanjem i konvektivni vrtlozi koji su nastali prijenosom topline predstavljaju efikasan način prijenosa impulsa na tlo kao i odvođenje topline i vlage s podloge.

Ovisno o ravnoteži mehaničkog i toplinski uzrokovanog miješanja strujanja u donjim slojevima atmosfere, mijenja se temperaturna stratifikacija AGS-a koja može značajno utjecati na obilježja vjetra pri malim brzinama, disperziju onečišćenja zraka, urbanu mikrometeorologiju, itd. AGS može biti stabilno, neutralno ili nestabilno temperaturno stratificiran ovisno o gradijentu temperature između tla, vodene ili ledene površine i strujanja zraka (npr., Serafin i sur., 2018).

Utjecaj valova relativno dugog razdoblja trajanja, npr. dulje od 60 s, se uobičajeno zanemaruje pri analizi opterećenja vjetra na konstrukcije, tj. smatra se da je brzina vjetra u AGS-u kvazistacionarna. U urbanim područjima u blizini tla, standardna devijacija fluktuacija brzine vjetra u odnosu na lokalnu usrednjenu vrijednost brzine, tj. intenzitet turbulencije, može iznositi oko 40 %, dok u buri brzina vjetra tijekom udara može biti i do pet puta veća od usrednjene vrijednosti brzine vjetra (npr., Durran, 1986).

Temperaturna stratifikacija prizemnog sloja atmosfere se može opisati bezdimenzijskim parametrom termičke stabilnosti,  $\zeta$ , kao omjer visine,  $z$ , i Obukhovljeve duljine,  $L$ , (npr., Stull, 1988):

$$\zeta = \frac{z}{L} = \frac{z}{\frac{-\overline{\theta} u_*^3}{g\kappa(\overline{w'\theta'})}} \quad (1)$$

gdje je  $\kappa$  von Kármánova konstanta iznosa oko 0,41,  $g$  je iznos ubrzanja sile teže  $9,81 \text{ m s}^{-2}$ ,  $\overline{\theta}$  je usrednjena vrijednost virtualne potencijalne temperature,  $\overline{w'\theta'}$  je lokalni vertikalni kinematički tok topline, a  $u_*$  je brzina trenja. Pozitivni parametar stabilnosti upućuje na termički stabilnu stratifikaciju, negativni na termički nestabilnu stratifikaciju, a ako je ovaj parametar jednak nuli, radi se o neutralnoj termičkoj stratifikaciji prizemnog sloja.

Iako se u novijim meteorološkim studijama za aproksimaciju vertikalnog profila usrednjene vrijednosti brzine puhanja vjetra rijetko koristi empirički zakon potencije jer ne uključuje uzgonske sile, on se uobičajeno primjenjuje u aerodinamici okoliša i konstrukcija. Zakonom potencije se na temelju usrednjene vrijednosti brzine vjetra na referentnoj visini, vrijednosti eksponenta zakona potencije, i debljine istisnuća, koji ovise o značajkama terena, računa usrednjena vrijednost brzine vjetra na određenoj visini. Prvi ga je predložio Hellman (1916) u obliku izraza:

$$\frac{\overline{u}_z}{\overline{u}_{ref}} = \left( \frac{z - d}{z_{ref} - d} \right)^\alpha \quad (2)$$

gdje je  $\overline{u}_z$  vremenski usrednjena vrijednost komponente brzine u  $x$ -smjeru na visini  $z$ ,  $\overline{u}_{ref}$  je vremenski usrednjena vrijednost komponente brzine u  $x$ -smjeru na referentnoj visini  $z_{ref}$ ,  $d$  je visina pomaka<sup>2</sup>,  $\alpha$  je eksponent zakona potencije koji ovisi o hrapavosti terena. Dyrbye i Hansen (1997) su pokazali da je zakon potencije primjenjiv za procjenu vertikalnog profila usrednjenih vrijednosti brzine vjetra kroz cjelokupni AGS, tj. do njegove gornje granice.

Logaritamski zakon (npr., Thuillier i Lappe, 1964), za razliku od zakona potencije, uzima u obzir utjecaj temperaturne stratifikacije na profil brzine te se stoga uobičajeno koristi u geofizici. Jedan od takvih primjera je proračun disperzije i razrjeđenje onečišćenja zraka kao

<sup>2</sup> Za izraz visina pomaka je u inženjerskoj zajednici uvriježen naziv debljina istisnuća (eng. *displacement height*).

i drugi fenomeni koji se pojavljuju pri brzinama vjetra manjim od približno  $5 \text{ m s}^{-1}$  kada utjecaj toplinskih tokova najčešće dominira u odnosu na inercijske sile strujanja zraka. Primjenjiv je kroz područje inercijskog podsloja AGS-a, tj. od tla do približno 100 m visine ovisno o stratifikaciji. Usrednjena vrijednost brzine vjetra na nekoj se visini računa na temelju brzine trenja,  $u_*$ , von Kármánove konstante (npr., Högström, 1988; Albertson i sur., 1997), aerodinamičke duljine hrapavosti površine,  $z_0$ , Obukhovljeve duljine,  $L$ , i korekcije za termičku stabilnost,  $\psi$ , inače empirijske funkcije od  $z$  i  $L$  preko izraza:

$$\frac{\bar{u}_z}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \left[ \ln \left( \frac{z-d}{z_0} \right) - \psi \left( \frac{z-d}{L} \right) \right]. \quad (3)$$

Intenzitet turbulencije je vrlo bitan integralni parametar kojim se opisuje atmosferska turbulencija. Računa se normiranjem standardne devijacije fluktuirajuće komponente strujanja zraka usrednjenom vrijednosti brzine strujanja (npr., Simiu i Scanlan, 1996):

$$I_u = \frac{\sqrt{\overline{u'^2}}}{\bar{u}} \quad I_v = \frac{\sqrt{\overline{v'^2}}}{\bar{u}} \quad I_w = \frac{\sqrt{\overline{w'^2}}}{\bar{u}}, \quad (4)$$

uz korištenje Reynoldsovog usrednjavanja:

$$u = \bar{u} + u' \quad v = \bar{v} + v' \quad w = \bar{w} + w' \quad (5)$$

gdje su  $\bar{u}$ ,  $\bar{v}$  i  $\bar{w}$  vremenski usrednjene vrijednosti brzine vjetra u longitudinalnom  $x$ -, lateralnom  $y$ - i vertikalnom  $z$ - smjeru, a  $u'$ ,  $v'$  i  $w'$  su pripadajuće fluktuirajuće komponente brzine vjetra. U ovom istraživanju je za usrednjavanje korištena klizna usrednjena vrijednost. Detaljni opis je dan u trećem poglavlju pod točkom 3.2.

Reynoldsovo smično naprezanje predstavlja doprinos prijenosu impulsa (količine) gibanja od strane turbulentnih gibanja. Računa se korištenjem korelacija fluktuirajućih komponenti brzine vjetra  $-\overline{\rho u' v'}$ ,  $-\overline{\rho u' w'}$ ,  $-\overline{\rho v' w'}$ , gdje je  $\rho$  gustoća zraka.

Integralna duljinska mjera turbulencije predstavlja usrednjeni karakteristični promjer turbulentnih vrtloga vjetra (npr., Holmes, 2007). Ti vrtlozi dominiraju spektrom i sadrže najviše

kinetičke energije turbulencije (npr., Raupach i sur., 1989). U ovom istraživanju je naglasak na duljinskim mjerama turbulencije u x-smjeru koje se odnose na  $u'$ ,  $v'$  i  $w'$  fluktuacije brzine jer je prethodno pokazano da je njihov utjecaj na inženjerske konstrukcije značajniji od ostalih komponenti koje će biti analizirane u nekom budućem radu (npr., ESDU 86010, 1986). Duljinske mjere turbulencije u x-smjeru koje se odnose na  $u'$ ,  $v'$  i  $w'$  fluktuacije brzine se računaju korištenjem autokorelacijskih funkcija (npr., ESDU 74030, 1976):

$$T_i = \int_0^{\infty} R_{ii}(\tau) d\tau, \quad (6)$$

gdje je  $R_{ii}$  funkcija autokorelacije,  $\tau$  vremenski period, i vrijedi  $i = u', v' i w'$ . Taylorova hipoteza o zamrznutoj turbulenciji pretpostavlja da se vrtlozi nošeni usrednjenim vjetrom,  $\bar{V}_z$ , većim od fluktuirajućih komponenti vjetra duž x-osi,  $u(t)$ , ne mijenjaju, tj. zamrznuti su u prostoru i struje preko određene točke u prostoru usrednjenom brzinom  $\bar{V}_z$ . Pretpostavljajući valjanost Taylorove hipoteze o zamrznutoj turbulenciji, duljinske skale turbulencije za  $i = u', v' i w'$  komponente duž x-osi dane su u obliku:

$${}^x L_i = T_i \bar{V}_z. \quad (7)$$

$$\bar{V}_z = \sqrt{u_z^2 + v_z^2} \quad (8)$$

Spektar gustoće snage fluktuacija brzine vjetra je mjera za kinetičku energiju turbulencije vjetra. Spektar gustoće snage komponente fluktuacija brzine vjetra u x-, y- i z- smjeru računa se uz korištenje brze Fourierove transformacije (FFT) (npr., Stull, 1988).

### 2.3 Značajke vjetra preporučene međunarodnim normama

Građevinska infrastruktura se projektira sukladno relevantnim normama i standardima koje su obvezni primijeniti naručitelji i izvođači radova. Većina navedenih normi i standarda se odnosi na štetu prouzročenu djelovanjem vjetra na konstrukcije, a značajke vjetra su uglavnom opisane za „standardni“ AGS. Paradoksalno je da su značajne štete uzrokovane vjetrom uslijed djelovanja nesinoptičkih, lokalnih oluja čije značajke mogu biti značajno različite od onih u „standardnom“ AGS-u (npr., Kozmar i Grisogono, 2021). Značajke tih ekstremnih lokalnih vjetrova nisu dane u relevantnim međunarodnim normama, što je još jedan

pokazatelj značaja ovog rada koji daje bitne nove informacije vezano uz buru i omogućava daljnji razvoj relevantnih međunarodnih normi s obzirom na značajke bure i njenog djelovanja na konstrukcije i vozila.

Jedan od ciljeva rada je usporedba značajki vertikalnih profila usrednjene brzine bure, vremenskih nizova intenziteta turbulencije, Reynoldsovog smičnog naprezanja, duljinskih mjera turbulencije i spektralne gustoće snage fluktuacija bure postignutih na temelju mjerenih vrijednosti s preporukama danim u relevantnim međunarodnim normama i standardima namijenjenim inženjerskim proračunima opterećenja vjetra na konstrukcije i vozila. Budući da se te norme rijetko primjenjuju u meteorološkim istraživanjima, u ovom poglavlju je dan pregled značajki vjetra koje su predmet ovog istraživanja preporučenih u normama koje se koriste u aerodinamici okoliša i konstrukcija. Različite norme koriste različite oznake za iste pojmove pa su zbog sukladnosti s dostupnom literaturom u tekstu korištene originalne oznake iz citirane literature. U različitim normama isti parametar ne mora imati jednaku definiciju niti predloženu vrijednost. Definicija i vrijednost parametra vrijede samo za normu u kojoj je preporučen navedeni parametar. Norme su navedene po abecednom redu.

- **AIJ (2006)**
  - **Vertikalni profil vjetra**

U AIJ (2006) je za proračun profila usrednjene vrijednosti brzine puhanja vjetra predložen zakon potencije oblika:

$$U_z = U_{Z_0} \left( \frac{z}{Z_0} \right)^\alpha \quad (9)$$

gdje je  $U_z$  usrednjena vrijednost brzine vjetra na visini  $z$ ,  $U_{Z_0}$  je usrednjena vrijednost brzine vjetra na visini  $Z_0$ , a  $\alpha$  je eksponent zakona potencije. Eksponent zakona potencije je veći iznad hrapavijeg (neravnijeg) terena, a utjecaj hrapavosti terena se smanjuje s porastom visine od tla. Eksponent zakona potencije, ovisno o vrstama terena, je dan u Tablici 1.

Tablica 1: Kategorije i parametri terena prema AIJ (2006);  $\alpha$  je eksponent zakona potencije,  $Z_b$  i  $Z_G$  su konstante koje se koriste za proračun intenziteta turbulencije za različite kategorije terena.

	Kategorija terena	$\alpha$	$Z_b$ [m]	$Z_G$ [m]
I	Otvorena površina bez značajnih prepreka, jezero, more	0,1	5	250
II	Otvorena površina, nekoliko prepreka, travnjaci, poljoprivredne površine	0,15	5	350
III	Predgrađe, šumovito područje, nekoliko visokih zgrada (4 do 9 katova)	0,2	10	450
IV	Grad, visoke zgrade (4 do 9 katova)	0,27	20	550
V	Grad, gusto područje visokih zgrada (viših od 10 katova)	0,35	30	650

○ **Intenzitet turbulencije**

Intenzitet turbulencije je dan izrazom:

$$I_z = I_{rz} E_{gI} \quad (10)$$

gdje je  $I_{rz}$  intenzitet turbulencije na visini  $z$  iznad ravnog terena,  $E_{gI}$  je faktor topografije za intenzitet turbulencije. Intenzitet turbulencije,  $I_{rz}$ , iznad ravnog terena je dan u odnosu na različite kategorije terena u Tablici 1:

$$I_{rz} = \begin{cases} 0,1 \left( \frac{z}{Z_G} \right)^{-\alpha-0,5} & Z_b < z < Z_G \\ 0,1 \left( \frac{Z_b}{Z_G} \right)^{-\alpha-0,5} & z \leq Z_b \end{cases} \quad (11)$$

pri čemu je  $z$  visina iznad tla, a  $Z_b$ ,  $Z_G$  i  $\alpha$  su konstantne koje ovise o kategoriji terena i dane su u Tablici 1. Faktor topografije za intenzitet turbulencije u uvjetima kada vjetar okomito nastrujava preko strmine ili orografije oblika grebena je definiran izrazom:

$$E_{gI} = \frac{E_I}{E_g} \quad (12)$$

gdje su:

$$E_I = (C_1 - 1) \left\{ C_2 \left( \frac{z}{H_s} - C_3 \right) + 1 \right\} e^{\left\{ -C_2 \left( \frac{z}{H_s} - C_3 \right) \right\} + 1} \quad (13)$$



$$E_g = (C_1 - 1) \left\{ C_2 \left( \frac{z}{H_s} - C_3 \right) + 1 \right\} e^{\left\{ -C_2 \left( \frac{z}{H_s} - C_3 \right) \right\} + 1} ; E_g \geq 1 \quad (14)$$

$$\theta_s = \tan^{-1} \frac{H_s}{2L_s} \quad (15)$$

$E_l$  je faktor topografije za standardnu devijaciju fluktuacija brzine vjetra,  $E_g$  je faktor topografije koji opisuje promjenu usrednjene brzine vjetra kada vjetar okomito nastrujava preko strmine ili orografije oblika grebena,  $C_1, C_2, C_3$  su parametri koji ovise o obliku orografije, nagibu  $\theta_s$  i udaljenosti  $X_s$  od vrha orografije do ispitivane lokacije,  $Z$  je visina,  $H_s$  je visina orografije, a  $L_s$  je horizontalna udaljenost od vrha orografije do polovice visine orografije.

#### ○ Duljinske mjere turbulencije

Duljinska mjera turbulencije, ne ovisi o vrsti terena i dana je izrazima:

$$L_z = \begin{cases} 100 \left( \frac{z}{30} \right)^{0,5}, & 30 \text{ m} < z \leq Z_G \\ 100, & z \leq 30 \text{ m} \end{cases} \quad (16)$$

gdje je  $z$  visina iznad površine, a  $Z_G$  je konstanta ovisna o značajkama terena danim u Tablici 1.

#### ○ Spektralna analiza

Spektrom gustoće snage fluktuacija vjetra je definiran doprinos energije turbulencije u ovisnosti o frekvenciji. Za određivanje spektralne gustoće snage fluktuirajuće komponente brzine vjetra u  $x$ -smjeru,  $F_u(f)$ , se koristi von Kármánov model:

$$F_u(f) = \frac{4\sigma_u^2 \left( \frac{L}{U} \right)}{\left\{ 1 + 70,8 \left( \frac{fL}{U} \right)^2 \right\}^{5/6}}. \quad (17)$$

$f$  je frekvencija,  $\sigma_u$  je standardna devijacija fluktuirajuće komponente brzine vjetra u  $x$ -smjeru,  $U$  je usrednjena brzina vjetra, a  $L$  je duljinska mjera turbulencije.

- **ASCE (2006)**

- **Intenzitet turbulencije**

U ASCE 7-05 (2006) je intenzitet turbulencije dan izrazom:

$$I_{\bar{z}} = c \left( \frac{10}{\bar{z}} \right)^{\frac{1}{6}} \quad (18)$$

gdje je  $I_{\bar{z}}$  intenzitet turbulencije na visini  $\bar{z}$  koja predstavlja ekvivalentnu visinu objekta definiranu s  $0,6\delta$ , pri čemu  $\bar{z}$  ne smije biti manji od  $z_{\min}$  za zgrade visine  $\delta$ . U Tablici 2 su dane vrijednosti parametara  $z_{\min}$  i  $c$  u ovisnosti o izloženosti terena. U Tablici 3 je dan opis terena za različite oznake površinske hrapavosti.

Tablica 2: Konstante za različite izloženosti terena (preuzeto iz ASCE 7-05 (2006)). Parametri  $c$  i  $z_{\min}$  se koriste za proračun intenziteta turbulencije, a  $\ell$  i  $\bar{\epsilon}$  za proračun duljinske mjere turbulencije.

Izloženost		c	$z_{\min}$ [m]	$\ell$ [m]	$\bar{\epsilon}$
B	Prevladava površinska hrapavost B u smjeru uz vjetar najmanje duljine 792 m ili duljine 20 visina zgrade ovisno što je veće.	0,30	97,54	1/3,0	9,14
C	Gdje nisu primjenjive izloženosti B i D	0,20	152,4	1/5,0	4,57
D	Prevladava površinska hrapavost D u području uz vjetar na udaljenostima većim od 1524 m ili duljine 20 visina zgrade. Prevladava u smjeru niz vjetar u područjima površinske hrapavosti B ili C na udaljenosti većoj od 200 m ili duljine 20 visina zgrade, ovisno što je veće.	0,15	198,12	1/8,0	2,13

Tablica 3: Opis terena za različite površinske hrapavosti (preuzeto iz ASCE 7-05 (2006))

Površinska hrapavost B	Urbano i prigradsko područje, šumovito područje ili drugi tereni s brojnim usko raspoređenim preprekama
Površinska hrapavost C	Otvoreni teren s raštrkanim preprekama s visinama uglavnom manjim od 9,1 m. Ova kategorija uključuje ravnu otvorenu površinu, travnjake i sve vodene površine u područjima sklonim uraganima.
Površinska hrapavost D	Ravno područja i vodena površina izvan područja sklonih uraganima. Ova kategorija uključuje glatke površine i led.

- **Duljinska mjera turbulencije**

U ASCE 7-05 (2006) je duljinska mjera turbulencije,  $L_{\bar{z}}$ , definirana izrazom:

$$L_{\bar{z}} = \ell \left( \frac{\bar{z}}{10} \right)^{\bar{\epsilon}} \quad (19)$$

gdje su  $\ell$  i  $\bar{\epsilon}$  konstante navedene u Tablici 2.

- **ESDU 85020 (1985)**

- **Vertikalni profil vjetra**

U Tablici 1 su dane preporučene vrijednosti parametara  $z_0$  i  $d$  sukladno međunarodnoj normi ESDU 85020 (1985). EkspONENT zakona potencije,  $\alpha$ , se računa korištenjem Counihanovog (1975) izraza:

$$\alpha = 0,0961(\log z_0) + 0,016(\log z_0)^2 + 0,24. \quad (20)$$

Tablica 4: Tipične vrijednosti parametara  $z_0$  i  $d$  ovisno o tipu terena prema ESDU85020 (1985) i eksponenta  $\alpha$  izračunatog korištenjem izraza (20)

Opis terena	$z_0$ [m]	$d$ [m]	$\alpha$ [-]
Centar grada Šuma	0,7	15 – 25	0,23
Manji gradovi Predgrađa većih gradova Područje s puno stabala	0,3	5 – 10	0,19
Predgrađa manjih gradova i sela Pejzaž s puno živica, malo stabala i kuća	0,1	0 – 2	0,16
Poljoprivredno zemljište s malo stabala, živicom i rijetkim kućama	0,03	0	0,13
Travnate ravnice s ponekim drvetom	0,01	0	0,11
Nemirno more (50 godišnji ekstremi) Ravnice s niskom travom bez prepreka Pista zračne luke	0,003	0	0,10
Poljoprivredno zemljište prekriveno snijegom Pustinja Površina jezera za vrijeme oluje	0,001	0	0,10

- **Intenzitet turbulencije**

Intenzitet turbulencije je definiran kao omjer standardne devijacije fluktuacija brzine i usrednjene vrijednosti brzine vjetra na istoj visini. Intenzitet turbulencije u  $x$ - smjeru glasi:

$$I_u = \frac{\sigma_{u'} u_*}{u_* V_z} \quad (21)$$

gdje je  $V_z$  usrednjena satna vrijednost brzine vjetra na visini  $z$ ,  $\sigma_{u'}$  je standardna devijacija fluktuirajuće komponente vjetra  $u'$  na visini  $z$ , a  $u_*$  je brzina trenja. Omjer standardne devijacije fluktuirajuće komponente vjetra u  $x$ -smjeru na visini  $z$  i brzine trenja je dan izrazom:

$$\frac{\sigma_{u'}}{u_*} = \frac{7,5\eta \left[0,538 + 0,09 \ln \frac{z}{z_0}\right]^p}{1 + 0,156 \ln \left(\frac{u_*}{f z_0}\right)} \quad (22)$$

gdje je  $f$  Coriolisov parametar,  $z_0$  je aerodinamička duljina hrapavosti površine;  $\eta$  i  $p$  su dani izrazima:

$$\eta = 1 - \frac{6fz}{u_*} \quad (23)$$

$$p = \eta^{16}. \quad (24)$$

Omjer satne usrednjene vrijednosti brzine vjetra na visini  $z$  i brzine trenja je dan izrazom:

$$\frac{V_z}{u_*} = 2,5 \left[ \ln \frac{z}{z_0} + 34,5 \frac{fz}{u_*} \right]. \quad (25)$$

Intenzitet turbulencije u  $y$ -smjeru,  $I_v$ , i  $z$ - smjeru,  $I_w$ , ovise o intenzitetu turbulencije u  $x$ -smjeru,  $I_u$ :

$$I_v = \frac{\sigma_{v'}}{\sigma_{u'}} I_u \quad (26)$$

$$I_w = \frac{\sigma_{w'}}{\sigma_{u'}} I_u \quad (27)$$

pri čemu su omjeri standardne devijacije fluktuirajućih komponenti vjetra u  $y$ - i  $z$ - smjeru ( $\sigma_v$  i  $\sigma_w$ ) i standardne devijacije fluktuirajuće komponente vjetra u  $x$ -smjeru ( $\sigma_u$ ) na visini  $z$  dani izrazima:

$$\frac{\sigma_{v'}}{\sigma_{u'}} = 1 - 0,22 \cos^4 \left( \frac{\pi z}{2h} \right) \quad (28)$$

$$\frac{\sigma_{w'}}{\sigma_{u'}} = 1 - 0,45 \cos^4 \left( \frac{\pi z}{2h} \right), \quad (29)$$

gdje je  $h$  dan u obliku:

$$h = \frac{u_*}{6f}. \quad (30)$$

○ **Reynoldsovo smično naprezanje**

Reynoldsovo smično naprezanje predstavlja trenje kojim površina Zemlje djeluje na vjetar, a koje se silama smicanja prenosi vertikalno naviše kroz AGS (npr., ESDU 85020, 1985). Iznosi kovarijanci  $\overline{u'v'}$  i  $\overline{v'w'}$  su zanemarivi u odnosu na iznos kovarijance  $\overline{u'w'}$  definirane smičnim naprezanjem  $\tau_z$ :

$$\tau_z \approx -\rho \overline{u'w'} = \rho u_*^2 \left(1 - \frac{z}{h}\right)^2. \quad (31)$$

Za visine do 300 m vrijedi izraz:

$$\frac{-\overline{u'w'}}{\sigma_{u'}\sigma_{w'}} \approx \frac{u_*^2 \left(1 - 2\frac{z}{h}\right)}{\sigma_{u'} \left(\frac{\sigma_{w'}}{\sigma_{u'}}\right) \sigma_{u'}} = \frac{1 - 2\frac{z}{h}}{\left(\frac{\sigma_{u'}}{u_*}\right)^2 \left(\frac{\sigma_{w'}}{\sigma_{u'}}\right)} \quad (32)$$

○ **Duljinska mjera turbulencije**

Duljinska mjera turbulencije za fluktuirajuću komponentu brzine vjetra u  $x$ -smjeru u ESDU 85020 (1985) je dana izrazom:

$${}^xL_{u'} = {}^xL'_{u'} \times k_L \quad (33)$$

gdje je  ${}^xL'_{u'}$  duljinska mjera turbulencije za fluktuirajuću komponentu vjetra u  $x$ -smjeru pri ravnotežnim uvjetima kada usrednjena vrijednost brzine vjetra na visini 10 m iznosi  $20 \text{ m s}^{-1}$ , a Coriolisov parametar  $10^{-4} \text{ rad s}^{-1}$ . Ako je poznata vrijednost aerodinamičke duljine hrapavosti tla, vrijednost  ${}^xL'_{u'}$  se preuzme sa Slike 3. Koeficijent  $k_L$  je dan izrazom:

$$k_L = \left[ \frac{V_{10r} 10^{-4}}{20 f} \right]^c \quad (34)$$

gdje je  $V_{10r}$  referentna usrednjena satna vrijednost brzine vjetra na visini 10 m pri  $z_0 = 0,03$  m,  $f$  je Coriolisov parametar,  $c$  je koeficijent koji se za poznatu vrijednost aerodinamičke hrapavosti površine tla očitava iz Slike 4.

Duljinske mjere turbulencije za fluktuirajuću komponentu vjetra u  $y$ -smjeru,  ${}^xL_{v'}$ , i  $z$ -smjeru,  ${}^xL_{w'}$ , uz duljinsku mjeru turbulencije za fluktuirajuću komponentu brzine vjetra u  $x$ -smjeru,  ${}^xL_{u'}$ , su dane izrazima:

$$\frac{{}^xL_{v'}}{{}^xL_{u'}} = 0,5 \left( \frac{\sigma_{v'}}{\sigma_{u'}} \right)^3 \quad (35)$$

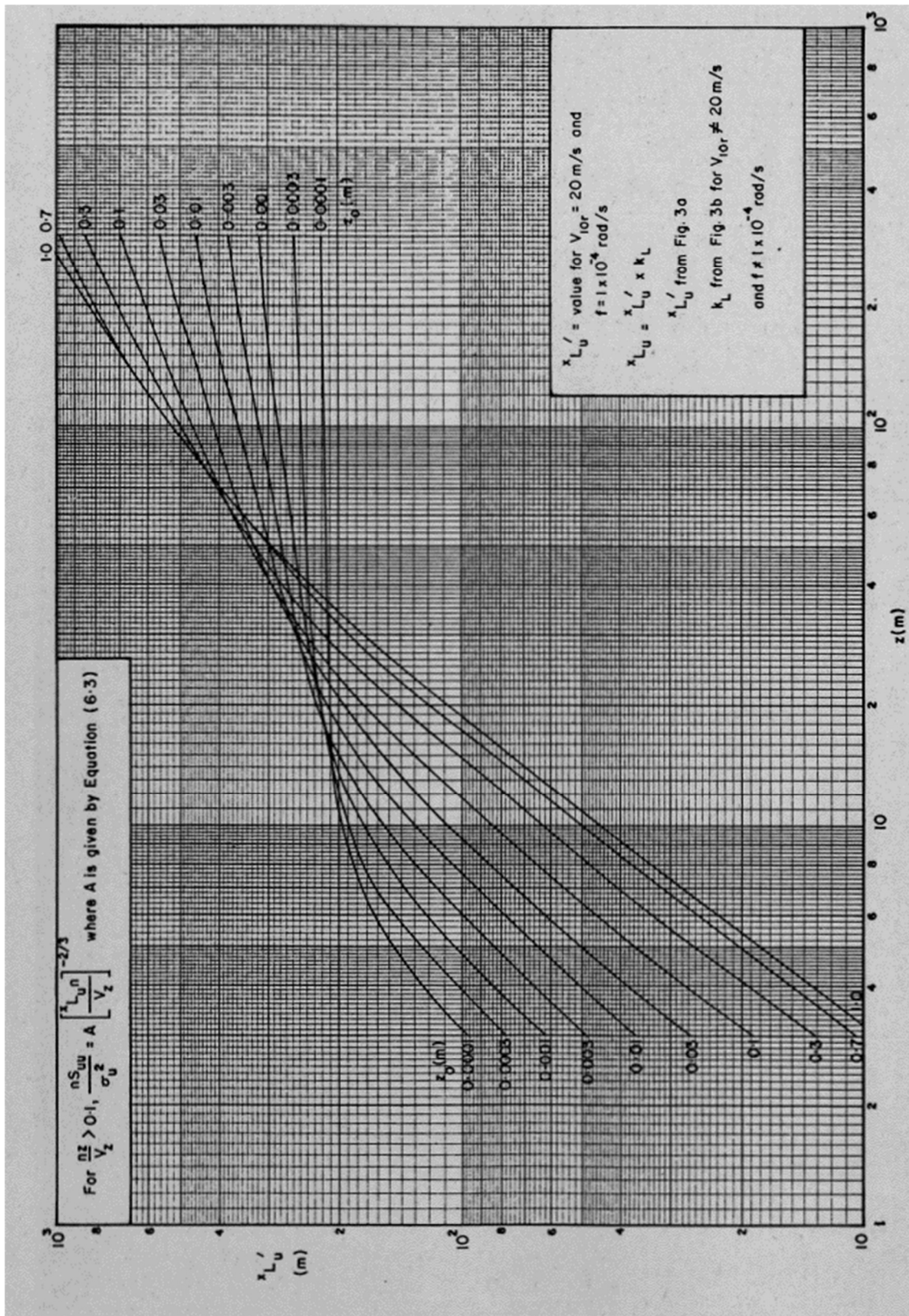
$$\frac{{}^xL_{w'}}{{}^xL_{u'}} = 0,5 \left( \frac{\sigma_{w'}}{\sigma_{u'}} \right)^3. \quad (36)$$

Omjeri standardnih devijacija fluktuirajućih komponenti brzine vjetra u  $x$ -smjeru i  $y$ -smjeru te  $x$ - i  $z$ -smjeru na visini  $z$  su dani izrazima:

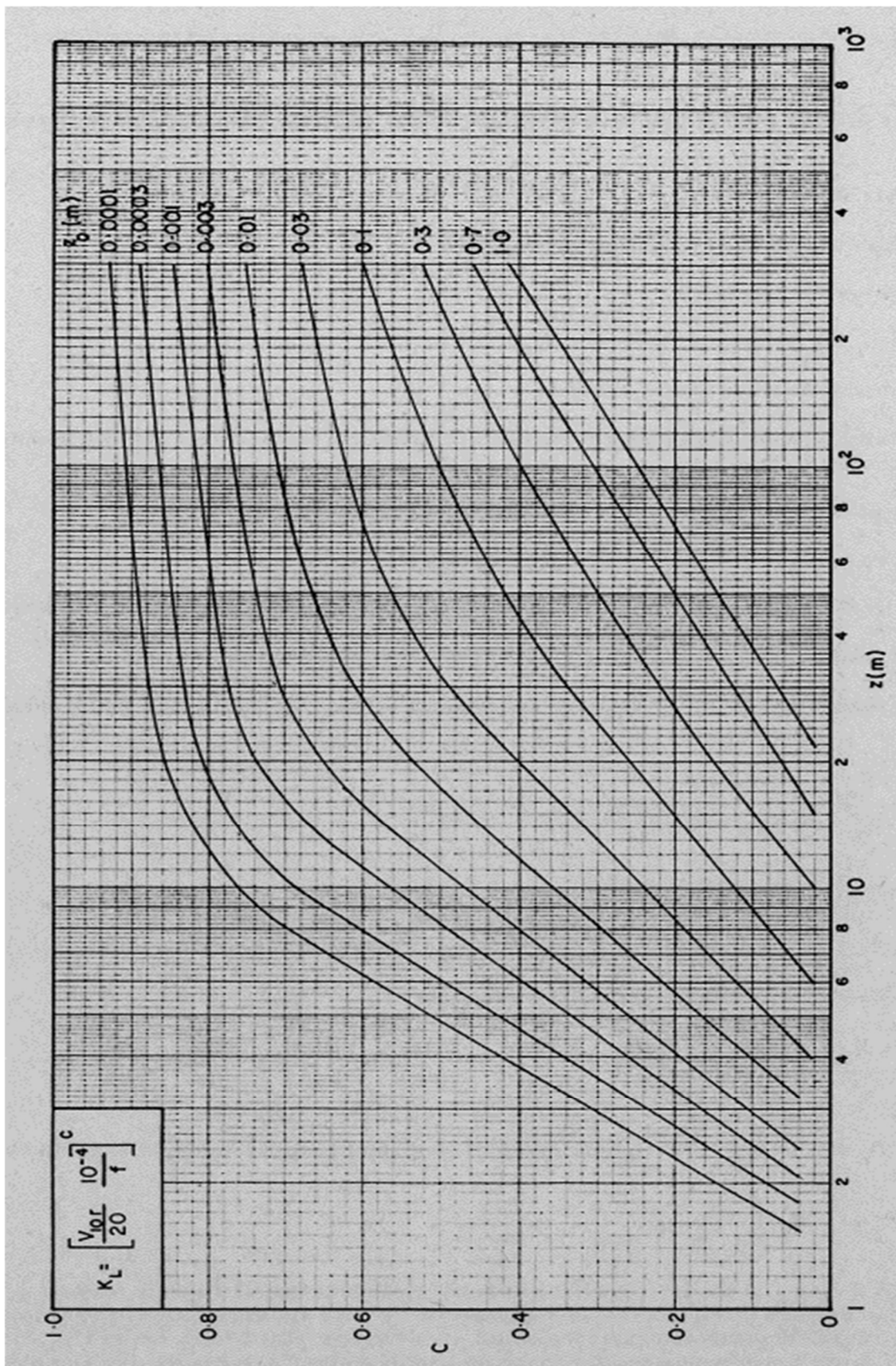
$$\frac{\sigma_{v'}}{\sigma_{u'}} = 1 - 0,22 \cos^4 \left( \frac{\pi z}{2h} \right) \quad (37)$$

$$\frac{\sigma_{w'}}{\sigma_{u'}} = 1 - 0,45 \cos^4 \left( \frac{\pi z}{2h} \right) \quad (38)$$

gdje je  $h$  visina (debljina) AGS-a,  $z$  je visina na kojoj se provode proračuni.



Slika 3: Duljinska mjera turbulencije za fluktuirajuću komponentu brzine vjetra u x-smjeru,  $x'_{L_u}$ , pri ravnotežnim uvjetima kada usrednjena vrijednost brzine vjetra na visini 10 m iznosi 20 m s<sup>-1</sup>, a Coriolisov parametar je 10<sup>-4</sup> rad s<sup>-1</sup>. (Slika preuzeta iz ESDU 85020 (1985)).



Slika 4: Korekcijski faktor za utjecaj usrednjene brzine vjetra na visini 10 m i Coriolisove sile s obzirom na duljinsku mjeru turbulencije za fluktuirajuću komponentu brzine vjetra u  $x$ -smjeru,  $^xL_u$ . (Slika preuzeta iz ESDU 85020 (1985)).



- **Spektralna analiza**

U ESDU 85020 (1985) i AIJ (2006) je za određivanje spektralne gustoće snage fluktuirajuće komponente brzine vjetra u  $x$ -smjeru,  $u'$ , preporučeni von Kármánov model:

$$\frac{nS_{u'u'}}{\sigma_{u'}^2} = \frac{4n_{u'}}{(1 + 70,8n_{u'}^2)^{5/6}} \quad (39)$$

$$n_{u'} = \frac{{}^xL_{u'}n}{V_z} \quad (40)$$

gdje je  $n$  frekvencija,  $V_z$  usrednjena satna vrijednost brzine vjetra na visini  $z$ ,  $\sigma_{u'}$  je standardna devijacija fluktuirajuće komponente vjetra  $u'$  na visini  $z$  i  ${}^xL_u$  je duljinska mjera turbulencije u  $x$ -smjeru za fluktuirajuću komponentu vjetra u  $x$ -smjeru.

Spektar gustoće snage fluktuirajućih komponenti brzine vjetra u  $y$ -smjeru i  $z$ -smjeru,  $S_{v'v'}$  i  $S_{w'w'}$ , uz  $i = v'$  ili  $w'$ :

$$\frac{nS_{ii}}{\sigma_i^2} = \frac{4n_i(1 + 755,2n_i^2)}{(1 + 283,2n_i^2)^{11/6}} \quad (41)$$

$$n_i = \frac{{}^xL_i n}{V_z} \quad (42)$$

gdje je  $n$  frekvencija,  $V_z$  je usrednjena satna vrijednost brzine vjetra na visini  $z$ ,  $\sigma_i$  je standardna devijacija fluktuirajuće komponente brzine vjetra  $v'$  ili  $w'$  na visini  $z$ , a  ${}^xL_i$  je duljinska mjera turbulencije u  $x$ -smjeru za fluktuirajuću komponentu vjetra u  $y$ -smjeru ili  $z$ -smjeru.

- **HRN EN 1991-1-4:2012 (2012)**

- **Intenzitet turbulencije**

U HRN EN 1991-1-4:2012 (2012) je intenzitet turbulencije  $I_v(z)$  na visini  $z$  definiran kao omjer standardne devijacije fluktuacija brzine vjetra,  $\sigma_v$ , i usrednjene vrijednosti brzine vjetra. Standardna devijacija fluktuacija brzine vjetra je dana izrazom:

$$\sigma_v = k_r v_b k_l \quad (43)$$

gdje je  $k_r$  faktor terena,  $v_b$  je osnovna brzina vjetra, a  $k_l$  je faktor turbulencije. Prema HRN EN 1991-1-4:2012 je osnovna brzina vjetra sukladno temeljna osnovna brzina vjetra koja je izmijenjena na način da uzima u obzir smjer vjetra i godišnje doba. Temeljna osnovna brzina vjetra je 10-min usrednjena brzina vjetra s godišnjom vjerojatnosti premašaja od 2 % neovisno o smjeru vjetra na visini od 10 m iznad ravnog otvorenog terena u Tablici 5.

Faktor terena,  $k_r$ , ovisi o aerodinamičkoj duljini hrapavosti tla  $z_0$ , a dan je izrazom:

$$k_r = 0,19 \left( \frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0,07}, \quad (44)$$

gdje je  $z_{0,II} = 0,05$  m za teren kategorije II u Tablici 5.

Osnovna brzina vjetra je dana izrazom:

$$v_b = c_{dir} c_{season} v_{b,0}, \quad (45)$$

gdje je  $c_{dir}$  faktor smjera,  $c_{season}$  je faktor godišnjeg doba,  $v_{b,0}$  je temeljna vrijednost osnovne brzine vjetra za 10-min usrednjenu vrijednost brzine vjetra, neovisno o smjeru vjetra i godišnjem dobu na visini 10 m iznad terena kategorije II u Tablici 5. Temeljna vrijednost osnovne brzine vjetra  $v_{b,0}$  je karakteristična 10-min usrednjena brzina vjetra koja ne ovisi o smjeru vjetra i dobu godine, na visini od 10 m iznad tla na otvorenom terenu u prirodi s niskim raslinjem i preprekama na razmaku najmanje 20 visina prepreke. Preporučena vrijednost faktora smjera i faktora godišnjeg doba je 1, no dopušteno ju je odrediti sukladno nacionalnom dodatku pojedine države.

Za izračun intenziteta turbulencije je preporučeno korištenje izraza:

$$I_v(z) = \begin{cases} \frac{\sigma_v}{v_m(z)} = \frac{k_I}{c_0(z) \ln(z/z_0)} & \text{za } z_{min} \leq z \leq z_{max} \\ I_v(z_{min}) & \text{za } z < z_{min} \end{cases} \quad (46)$$

gdje je  $v_m(z)$  usrednjena brzina vjetra,  $k_I$  je faktor turbulencije koji se određuje u nacionalnom dodatku,  $c_0$  je faktor vertikalne razvedenosti terena,  $z_0$  je aerodinamička duljina hrapavosti tla.

Tablica 5: Kategorije i parametri terena (preuzeto iz HRN EN 1991-1-4:2012)

	Kategorija terena	$z_0$ [m]	$z_{min}$ [m]
0	More ili priobalno područje izloženo otvorenom moru	0,003	1
I	Jezero ili ravno i horizontalno područje sa zanemarivom vegetacijom i bez prepreka	0,01	1
II	Područje s niskom vegetacijom, npr. travom, i izoliranim preprekama (drveće, zgrade) s razmakom najmanje 20 visina prepreke	0,05	2
III	Područje sa stalnim pokrovom vegetacije ili zgrade ili područja s izoliranim preprekama s razmakom najviše 20 visina prepreke (npr. sela, predgrađa, šuma)	0,3	5
IV	Područje s najmanje 15 % izgrađene površine, pri čemu prosječna visina zgrada premašuje 15 m	1,0	10

### ○ Duljinska mjera turbulencije

U HRN EN 1991-1-4:2012 (2012) je duljinska mjera turbulencije,  $L(z)$ , za visine manje od 200 m dana izrazima:

$$L(z) = \begin{cases} L_t \left( \frac{z}{z_{ref}} \right)^\alpha & za \ z \geq z_{min} \\ L(z_{min}) & za \ z < z_{min} \end{cases} \quad (47)$$

gdje referentna visina  $z_{ref}$  iznosi 200 m, a referentna duljinska mjera turbulencije  $L_t$  iznosi 300 m. Parametar  $\alpha$  nema značenje eksponenta zakona potencije, već je dan izrazom:

$$\alpha = 0,67 + 0,05 \ln(z_0) \quad (48)$$

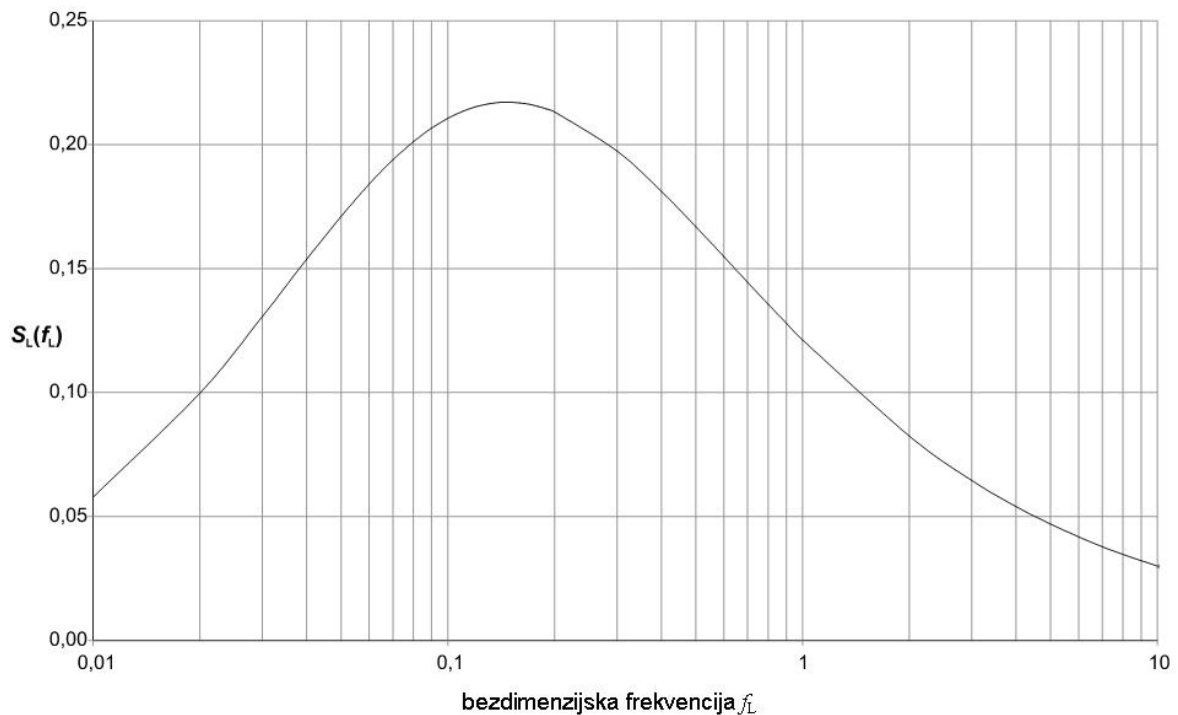
gdje je aerodinamička duljina hrapavosti tla izražena u metrima. Minimalna visina  $z_{min}$  je dana u Tablici 5.

### ○ Spektralna analiza

Spektar gustoće snage fluktuacija brzine vjetra definira doprinos energiji turbulencije u ovisnosti o frekvenciji. Prema HRN EN 1991-1-4:2012 (2012) je raspodjela vjetra po frekvencijama opisana bezdimenzijskom funkcijom spektralne gustoće snage  $S_L(z,n)$ :

$$S_L(z, n) = \frac{nS_V(z, n)}{\sigma_v^2} = \frac{6,8 f_L(z, n)}{(1 + 10,2 f_L(z, n))^{\frac{5}{3}}}. \quad (49)$$

$S_V(z, n)$  je jednostrana varijanca spektra, a  $f_L(z, n) = \frac{nL(z)}{v_m(z)}$  je bezdimenzijska frekvencija definirana vlastitom frekvencijom konstrukcije  $n = n_{1,x}$ , usrednjenom vrijednosti brzine  $v_m$  i duljinskom mjerom turbulencije  $L(z)$  iz izraza (46). Spektar gustoće snage fluktuacija brzine vjetra u mikrometeorološkom dijelu spektra je dan na Slici 5.



Slika 5: Spektar gustoće snage fluktuirajuće komponente brzine vjetra prema HRN EN 1991-1-4:2012 (2012) (Slika preuzeta iz HRN EN 1991-1-4:2012 (2012))

- **ISO 4354 (1997)**
  - **Vertikalni profil vjetra**

U međunarodnoj normi ISO 4354 (1997) je definiran faktor izloženosti koji opisuje promjenu referentnog tlaka vjetra s visinom, hrapavosti tla i značajkama terena. Iznad ravnog terena je faktor izloženosti na visini  $z$  definiran logaritamskim zakonom:

$$C_{exp,z} = k_{l,z_0} \left[ \ln \left( \frac{z}{z_0} \right) \right]^2 \quad (50)$$

gdje su vrijednosti  $k_{l,z_0}$  za različite aerodinamičke duljine hrapavosti površine,  $z_0$  i značajke terena dane u Tablici 6. Iako je  $\alpha$  uobičajena oznaka za eksponent zakona potencije, u ovoj normi se za taj parametar koristi oznaka  $\beta$ . Ako se faktor izloženosti na visini  $z$  iznad ravnog terena izražava zakonom potencije, taj izraz je dan kao:

$$C_{exp,z} = k_{\rho,z_0} \left( \frac{z}{10} \right)^{2\beta} \quad (51)$$

gdje parametri  $k_{\rho,z_0}$  i  $\beta$  ovise o hrapavosti tla i prikazani su u Tablici 6.

Tablica 6: Kategorije i parametri terena prema ISO 4354 (1997)

Kategorija terena	Logaritamski profil		Zakon potencije	
	$z_0$ [m]	$k_{l,z_0}$	$\beta$	$k_{\rho,z_0}$
Otvoreno more	0,003	0,021	0,11	1,4
Otvoreni teren	0,03	0,030	0,14	1,0
Predgrađe, šumovito područje	0,3	0,041	0,22	0,5
Centar grada	3	0,058	0,31	0,16

#### o Intenzitet turbulencije

U ISO 4354 (1997) je intenzitet turbulencije definiran kao omjer standardne devijacije fluktuacija brzine i usrednjene vrijednosti brzine vjetera. Iznad ravnog terena, intenzitet turbulencije je moguće računati sukladno izrazu:

$$I_u \approx \frac{1}{\ln\left(\frac{h}{z_0}\right)} \quad (52)$$

gdje je  $h$  visina strukture, a  $z_0$  je aerodinamička duljina hrapavosti tla za odgovarajući tip terena prema Tablici 6. Za uvjete otvorenog terena  $z_0$  iznosi 0,03 m, a za konstrukcije na tlu visine oko 10 m vrijedi  $I_u \approx 0,17$ .

Na brdovitom terenu obilježenom neravninama moguće je lokalno povećanje usrednjene vrijednosti brzine vjetera, tzv. „speed-up“ efekt, što zahtijeva proračun intenziteta turbulencije  $I_u$  sukladno izrazu:

$$I_u^* = I_u \sqrt{\frac{C_{exp}}{C_{exp,mod}}} \quad (53)$$

gdje je  $I_u^*$  normirani intenzitet turbulencije,  $C_{exp}$  je faktor izloženosti, a  $C_{exp,mod}$  je modificirani faktor izloženosti za brdoviti teren. Kod faktora izloženosti se uzima u obzir promjena brzine vjetra na poziciji objekta za svaki tip oluje u odnosu na visinu iznad tla, hrapavost terena i orografiju. Vrijednost faktora izloženosti ovisi o smjeru vjetra. Na visini  $z$  je faktor izloženosti definiran izrazom (50) ili zakonom potencije sukladno izrazu (51).

U blizini hrpta brda i na udaljenosti  $|x| < k_{red}L_H$ , gdje je parametar  $L_H$  visina do polovice visine orografije, faktor izloženosti je modificiran. Modificirani faktor izloženosti se računa sukladno izrazu:

$$C_{exp,mod} = C_{exp,z} \left[ 1 + \Delta S_{t,max} \left( 1 - \frac{|x|}{k_{red}L_H} \right) e^{-\left(\frac{\alpha z}{L_H}\right)} \right]^2, \quad (54)$$

gdje je  $C_{exp,z}$  faktor izloženosti iznad ravnog terena definiran jednadžbama (50) ili (51),  $H$  je visina brda,  $k_{red}$  je faktor redukcije,  $\Delta S_{t,max}$  je relativni „speed-up“ faktor pri površini hrpta brda,  $\alpha$  je koeficijent „speed-up“-a. Parametri  $\Delta S_{t,max}$  i  $\alpha$  ovise o obliku i strmini brda, kako je dano u Tablici 7.

Tablica 7: Parametri za maksimalne „speed-up“ vrijednosti iznad niskih brda (preuzeto iz ISO 4354 (1997))

Oblik brda	$\Delta S_{t,max}$	$\alpha$	$k_{red}$	
			$x < 0$	$x > 0$
Dvodimenzijski grebeni (ili doline s negativnim $H$ )	$2^{H/L_H}$	3	1,5	1,5
Dvodimenzijska strmina	$1,8^{H/L_H}$	2,5	1,5	4
Trodimenzijsko asimetrično brdo	$1,6^{H/L_H}$	4	1,5	1,5

### 3 METODOLOGIJA

#### 3.1 Mjerna oprema i postupak mjerenja

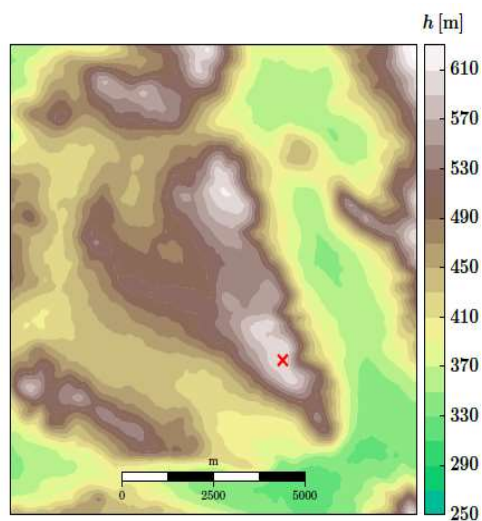
Istraživanje je provedeno na temelju podataka izmjerenih na lokaciji Pometeno brdo u blizini Dugopolja u zaleđu grada Splita na zavjetrinskoj strani Dinarida, Slika 6. To je područje poznato po čestoj pojavi jake i olujne bure (npr., Makjanić, 1978, Jurčec, 1981, Grisogono i Belušić, 2009, Babić i sur., 2016). Točne zemljopisne koordinate mjernog mjesta su 43°36'28,9" N, 16°28'37,4" E na visini 618 m iznad usrednjene razine mora. Orografija mjernog mjesta prikazana je na Slici 6b. Toranj na kojemu su provedena mjerenja visok je 60 m. Na lokaciji mjerenja vegetaciju čini rijetko raspoređeno i razmaknuto grmlje i nisko raslinje niže od 3 m, Slika 6c. Mjerenja su provedena u razdoblju od travnja 2010. do lipnja 2011. godine. Ultrazvučnim anemometrima WindMaster Pro proizvođača Gill Instruments izmjerene su istočna, sjeverna i vertikalna komponenta brzine vjetra na visinama 10 m, 22 m i 40 m, a također je izmjerena i ultrazvučna temperatura. Ovi anemometri imaju specifičan koordinatni sustav kojemu je *x*-os orijentirana prema sjeveru, a *y*-os prema zapadu, Slika 7, što je bitno za uzeti u obzir pri transformaciji komponenti brzina vjetra u istočnu i sjevernu komponentu.

Ultrazvučni anemometri mjere vrijeme potrebno da ultrazvučni impuls prijeđe put od gornjeg odašiljača prema donjem prijemniku te ga uspoređuju s vremenom potrebnim da zvučni impuls prijeđe od donjeg odašiljača prema gornjem prijemniku. Smjer i brzina vjetra tako direktno utječu na brzinu zvuka, pa se na taj način određuju vrijednosti komponenti brzine vjetra. S obzirom na činjenicu da ultrazvučni anemometri nemaju pomične dijelove, prikladni su za dugotrajnu upotrebu na udaljenim automatskim mjernim postajama i u područjima gdje na točnost i pouzdanost tradicionalnih šaličnih anemometara utječu čestice morske soli u zraku ili prašina. Neki od nedostataka ultrazvučnih anemometara su njihova visoka cijena i mogući gubitak signala zbog jake kiše ili snijega.

Svaki je anemometar postavljen na jedan kraj aluminijskih šipki duljine 2 m, čiji je drugi kraj pričvršćen na toranj na način da su anemometri okrenuti u smjeru glavnih očekivanih smjerova puhanja bure kako bi bio umanjen utjecaj tornja na mjerenja. Frekvencija uzorkovanja je 5 Hz, a mjerenja su bilježena pomoću CR1000 uređaja za prikupljanje podataka proizvođača Campbell Sci. Inc., Lincoln, Nebraska, USA. Cijeli sustav je solarno napajan električnom energijom.



(a)



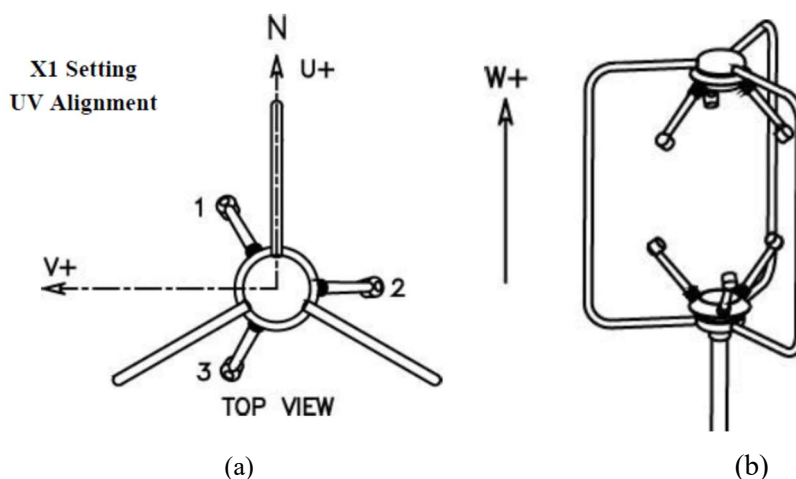
(b)



(c)

Slika 6: (a) Geografska lokacija Pometenog brda ( $43^{\circ}36'28,9''$  N,  $16^{\circ}28'37,4''$  E na visini 618 m iznad usrednjene razine mora), (b) orografija mjernog mjesta gdje križić označava poziciju meteorološkog tornja (preuzeto iz Babić i sur., 2016), (c) lokacija i vegetacija oko mjernog mjesta (preuzeto iz Lepri i sur., 2015).





Slika 7: (a) Definicija koordinatnih osi na ultrazvučnim anemometrima WindMaster Pro proizvođača Gill Instruments;  $x$ -os je usmjerena prema sjeveru a  $y$ -os prema zapadu. Položaji ultrasoničnih senzora označeni su brojevima 1 -3. (b) Skica anemometra postavljenog na vertikalni stup s označenim smjerom vertikalne komponente vjetra. (Slika preuzeta iz Uputa za uporabu WindMaster and WindMaster Pro, Gill Instruments)

Budući da je visinska razlika između najviše i najniže točke mjerenja prilično mala, tj. 30 m, u ovom istraživanju se smatra da se u tom sloju blizu tla smjer vjetra ne mijenja bitno s promjenom visine zbog intenzivnog miješanja strujanja zraka (npr., Lepri i sur., 2014). No, bitno je pripomenuti da kut između strujanja uz površinu i geostrofičkog vjetra daleko od površine može doseći i do  $35^\circ$  (npr., Grisogono, 2011), zbog Coriolisove sile i drugih utjecaja koje je potrebno uzeti u obzir pri provođenju mjerenja na visinama znatno većim od 40 m. Nadalje, tri mjerne visine smatraju se dostatnima za opis profila brzine u blizini tla sa zadovoljavajućom točnošću, a jedan od ciljeva ovog rada jest određivanje trendova u promjeni koeficijenta zakona potencije, brzine trenja i aerodinamičke duljine hrapavosti površine s obzirom na usrednjenu brzinu vjetra. Tipična meteorološka mjerenja površinskog sloja u neutralnim uvjetima termičke stabilnosti se inače obično provode na jednoj ili dvije visine (npr., Stull, 1988; Likso i Pandžić, 2011).

### 3.2 Obrada i analiza rezultata mjerenja

Prije analize mjerenih podataka provjerena je njihova kvaliteta i uklonjeni su svi podaci loše kvalitete, sukladno npr. Pandžić (2002). Kako bi se podaci pripremili za daljnju analizu, vrlo mali broj uklonjenih podataka linearno je interpoliran. Usvojeni su kriteriji na temelju kojih su izdvojeni podaci vezani za pojedinačne epizode bure. Smatra se da podaci pripadaju epizodi bure ako je smjer vjetra sjeveroistočni uz negativne longitudinalne i lateralne komponente brzine vjetra te ako takvi uvjeti neprekidno traju minimalno 3 h (npr., Lepri i sur., 2017).

Podaci su prilagođeni koordinatnom sustavu u kojemu  $x$ -os predstavlja glavni smjer puhanja bure. Koordinatni sustav korištenih anemometara je specifičan;  $x$ -os je usmjerena prema sjeveru,  $y$ -os prema zapadu. Stoga su rotirane horizontalne komponente brzine za  $270^\circ$  u lijevo kako bi se mjerenja prikazala u standardnom desnom koordinatnom sustavu. Vrijednosti koje su nedostajale su interpolirane. Za svaku pojedinu epizodu bure je izračunat usrednjeni smjer horizontalnog vjetra te je koordinatni sustav zarotiran u smjeru linearno interpoliranog smjera usrednjenog vjetra na visini od 25 m. U novodefiniranom koordinatnom sustavu pozitivna  $x$ -os je usmjerena od NE prema SW (u smjeru usrednjenog vjetra i pripadna komponenta brzine je  $u$ ), a  $y$ -os je okomita na  $x$ -os i usmjerena od NW prema SE (pripadna komponenta brzine je  $v$ ). Daljnja analiza je rađena u ovako opisanom novodefiniranom koordinatnom sustavu.

Za proračun vremenski usrednjenih vrijednosti brzine bure korištena je klizna usrednjena vrijednost (klizni srednjak). Kako bi se ispitala osjetljivost podataka na izbor vrijednosti perioda usrednjavanja i odredio prikladni period usrednjavanja, provedeno je testiranje izborom nekoliko različitih vrijednosti i usporedbom dobivenih rezultata. Pri proračunu kliznih usrednjenih vrijednosti korišteni su periodi usrednjavanja od 5 min, 8 min, 17 min i 20 min. Izbor perioda usrednjavanja 5 min i 8 min motiviran je rezultatima Belušić i sur. (2006, 2007), koji su otkrili da se pulsacije bure, tj. kvazi-periodički doprinosi ukupnoj mahovitosti vjetra, mogu pojaviti s periodima otprilike između 3 min i 11 min. S druge strane, izbor perioda usrednjavanja 17 min i 20 min je motiviran rezultatima Magjarević i sur. (2011), koji su otkrili da nesigurnost za 17-min skalu iznosi  $\pm 3$  min. Iako i dalje postoji određena proizvoljnost u izboru dviju dodatnih skala, važno je da one obuhvaćaju dvije dinamički relevantne skale usrednjavanja. Oduzimanjem tako usrednjenih vrijednosti od originalnih vrijednosti brzine vjetra dobivene su fluktuirajuće komponente brzine vjetra koje osciliraju oko nule.

Kako bi se ispitala hipoteza o termički približno neutralno stratificiranom donjem sloju atmosfere za vrijeme pojedinih epizoda bure, provedeni su proračuni parametra termičke stabilnosti korištenjem izraza (1). U navedenim proračunima korišteni su izmjereni podaci ultrazvučne temperature.

Vrijednost eksponenta zakona potencije određena je prilagodbom izmjerenih podataka na zakon potencije dan izrazom (2) metodom najmanjih kvadrata. Budući da je teren u blizini mjernog mjesta uglavnom stjenovit, bez značajnije vegetacije, visina pomaka  $d = 0$  m. Vremenski usrednjene vrijednosti komponente brzine u  $x$ -smjeru na sve tri visine su normirane

odgovarajućom vremenski usrednjenom vrijednosti komponente brzine u  $x$ -smjeru na referentnoj visini. Za svaki vremenski korak postoji po jedan podatak na svakoj visini na kojoj su provedena mjerenja te je eksponent  $\alpha$  računat na temelju prilagodbe usrednjenih vrijednosti brzine bure u te tri točke na zakon potencije.

Prikladnost logaritamskog zakona istražena je na temelju izmjerenih podataka izračunate vrijednosti brzine trenja i aerodinamičke duljine hrapavosti tla. Zbog opravdane pretpostavke da je tipični površinski sloj bure približno neutralno termički stratificiran, u izrazu (3) moguće je zanemariti faktor korekcije za termičku stabilnosti  $\psi$ . Proračun je proveden na dva načina, i to 1) prilagodbom podataka na logaritamski zakon i 2) izravnom primjenom zakona na sloj između najniže i najviše točke mjerenja. Izravnom primjenom zakona na sloj između najviše i najniže točke mjerenja brzina trenja se računa korištenjem izraza:

$$u_* = \frac{\kappa(\bar{u}_2 - \bar{u}_1)}{\ln \frac{z_2}{z_1}} \quad (55)$$

gdje  $\bar{u}_1$  i  $\bar{u}_2$  predstavljaju vremenski usrednjene brzine vjetra u  $x$ -smjeru na odgovarajućim visinama  $z_1 = 10$  m i  $z_2 = 40$  m.

Izraz za proračun aerodinamičke duljine hrapavosti površine:

$$z_0 = z_1 e^{\left( -\frac{\bar{u}_1}{u_* - \bar{u}_1} \ln \frac{z_2}{z_1} \right)}. \quad (56)$$

Za svaki vremenski korak postoji po jedan podatak na svakoj visini te je prilagodba logaritamskom zakonu provedena na temelju tih triju točaka. Korištenjem metode linearne regresije na tri točke određen je pravac, a iz koeficijenata dobivenoga pravca izračunate su odgovarajuće vrijednosti brzine trenja i aerodinamičke duljine hrapavosti površine tla.

Budući da je jedan od ciljeva rada analiza atmosferske turbulencije u sloju bure, u radu su istraženi intenzitet turbulencije, Reynoldsovo smično naprezanje i duljinske mjere turbulencije, njihovi vremenski nizovi i osjetljivost na izbor perioda usrednjavanja za kliznu usrednjenu vrijednost. Po prvi puta određeno je Reynoldsovo smično naprezanje tijekom bure

na temelju izmjerenih podataka. Intenzitet turbulencije određen je iz (4), a fluktuirajuće su komponente brzine određene sukladno (5). Fluktuirajuće komponente brzine vjetra su usrednjene korištenjem identičnog perioda usrednjavanja korištenog za proračun usrednjene vrijednosti brzine vjetra te su potom normalizirane odgovarajućom usrednjenom vrijednošću za svaku pojedinu izmjerenu vrijednost. Iako je očekivano da kod usrednjavanja fluktuirajućih komponenti kvazistacionarnog strujanja rezultat bude nula, ovdje to nije slučaj. Isti postupak primijenjen je na sve tri komponente brzine vjetra za sva četiri perioda usrednjavanja, za svaku visinu zasebno.

Proračun intenziteta turbulencije u  $x$ -,  $y$ - i  $z$ - smjeru proveden je normiranjem standardne devijacije fluktuacija komponente strujanja odgovarajućom komponentom usrednjene brzine strujanja prema izrazu (4). Reynoldsovo smično naprezanje određeno je uz primjenu korelacija fluktuirajućih komponenti brzine vjetra. Duljinska mjera turbulencije u  $x$ -smjeru za svaku od fluktuirajućih komponenti brzine određena je primjenom autokorelacijskih funkcija uz pretpostavku Taylorove hipoteze zamrznute turbulencije sukladno izrazima (6) i (7). Taylorova hipoteza je primjenjiva pod pretpostavkom da je ukupna usrednjena vrijednost brzine vjetra veća od fluktuirajuće komponente vjetra u  $x$ -smjeru.

Raspodjela kinetičke energije vjetra po frekvenciji izuzetno je bitna pri proračunima djelovanja vjetra na konstrukcije budući da je potrebno izbjeći podudarnost vlastite frekvencije konstrukcije i frekvencije dominantnih pulsacija i fluktuacija vjetra. Sukladno navedenom proveden je izračun spektralne gustoće snage fluktuacija brzine vjetra za sve tri fluktuirajuće komponente brzine na tri visine korištenjem brze Fourierove transformacije prema Stull (1988). Dobivene vrijednosti uspoređene su s vrijednostima danim u ESDU 85020 (1985).

### **3.3 Zabilježene epizode bure**

Tijekom vremenskog razdoblja u kojem su provedena mjerenja zabilježeno je ukupno 269 pojedinačnih epizoda bure koje su trajale od nekoliko sati do pet dana. Zbog velikog broja zabilježenih epizoda bure odabrano je 119 epizoda koje su neprekidno trajale minimalno 10 h. U Tablici 9 dan je kronološki prikaz osnovnih statističkih podataka za analiziranih 119 epizoda bure. Pojedine epizode bure dalje se u radu navode sukladno njihovim rednim brojevima danim u Tablici 8.

Tablica 8: Osnovni statistički podaci za analizirane epizode bure zabilježene na Pometenom brdu u razdoblju od travnja 2010. do lipnja 2011. godine

#	Početak	Kraj	Ukupno trajanje [h]	$V_{sr10}$ [m s <sup>-1</sup> ]	$V_{sr22}$ [m s <sup>-1</sup> ]	$V_{sr40}$ [m s <sup>-1</sup> ]	$V_{max10}$ [m s <sup>-1</sup> ]	$V_{max22}$ [m s <sup>-1</sup> ]	$V_{max40}$ [m s <sup>-1</sup> ]
1	16.04.2010	17.04.2010	17	6,5	7,3	7,5	15,3	15,4	15,6
2	17.04.2010	18.04.2010	11	5,4	5,8	6,2	10,5	10,3	10,3
3	28.04.2010	29.04.2010	14	7,5	8,5	9,1	18,2	18,4	18,9
4	18.05.2010	19.05.2010	13	5,0	6,0	6,4	13,6	13,2	13,2
5	19.05.2010	21.05.2010	33	7,6	9,2	9,9	20,1	21,8	22,2
6	21.05.2010	21.05.2010	16	7,1	8,5	9,4	16,6	18,5	17,7
7	22.05.2010	23.05.2010	15	5,5	6,8	7,8	17,1	18,0	18,2
8	23.05.2010	23.05.2010	11	4,1	4,7	4,9	11,4	11,9	11,4
9	23.05.2010	24.05.2010	13	4,6	5,1	5,2	11,1	12,7	10,2
10	04.06.2010	05.06.2010	23	6,3	7,6	8,2	18,0	19,2	20,0
11	05.06.2010	06.06.2010	11	4,6	5,1	5,3	10,3	10,2	10,3
12	22.06.2010	25.06.2010	66	7,2	8,6	9,2	24,8	25,6	23,8
13	27.06.2010	28.06.2010	15	5,5	6,7	7,5	16,9	16,8	18,3
14	18.07.2010	19.07.2010	17	6,0	6,8	6,8	17,6	16,6	16,7
15	19.07.2010	20.07.2010	14	4,2	4,6	4,8	9,8	11,0	9,9
16	24.07.2010	27.07.2010	62	9,0	10,6	11,4	24,9	24,9	25,7
17	31.07.2010	01.08.2010	10	3,5	3,8	4,1	10,8	10,7	10,6
18	08.08.2010	08.08.2010	11	3,6	4,0	4,2	10,2	10,5	10,0
19	08.08.2010	09.08.2010	10	2,2	2,6	2,9	4,8	5,2	5,2
20	09.08.2010	10.08.2010	11	3,1	3,4	3,6	6,1	6,5	6,3
21	10.08.2010	11.08.2010	12	3,3	3,7	3,9	9,7	10,0	10,1
22	11.08.2010	12.08.2010	10	2,5	2,9	3,2	5,1	5,2	5,4
23	21.08.2010	22.08.2010	20	5,0	5,7	6,0	13,0	13,5	16,4
24	28.08.2010	30.08.2010	34	7,6	8,9	9,5	27,2	29,4	28,9
25	30.08.2010	31.08.2010	10	4,7	5,7	6,6	10,5	11,5	12,0
26	01.09.2010	02.09.2010	11	3,9	4,4	4,5	10,7	10,5	11,0
27	05.09.2010	06.09.2010	10	3,5	3,8	4,0	7,3	7,5	7,8
28	10.09.2010	12.09.2010	48	8,1	9,5	10,1	22,5	22,8	23,4
29	12.09.2010	13.09.2010	15	3,4	3,9	4,1	8,4	10,2	9,4
30	13.09.2010	15.09.2010	36	5,0	5,8	6,2	15,1	16,3	15,5
31	19.09.2010	21.09.2010	36	5,6	6,6	7,0	17,6	18,1	18,5
32	21.09.2010	22.09.2010	14	4,5	5,0	5,1	10,5	10,6	9,9
33	22.09.2010	23.09.2010	13	3,3	3,8	4,3	6,7	7,6	7,0
34	29.09.2010	30.09.2010	19	4,3	4,9	5,1	11,8	13,6	13,9
35	06.10.2010	09.10.2010	72	5,6	6,3	6,6	15,7	16,6	17,3
36	09.10.2010	10.10.2010	16	3,5	3,9	4,0	11,2	11,0	11,4
37	10.10.2010	11.10.2010	12	5,0	5,4	5,9	10,5	10,6	10,8
38	12.10.2010	13.10.2010	10	3,4	3,9	4,3	8,5	8,0	8,2
39	13.10.2010	15.10.2010	43	5,1	5,7	5,8	15,1	15,7	14,3
40	15.10.2010	16.10.2010	14	4,0	4,3	4,5	10,0	10,1	10,5

Tablica 8: Nastavak

#	Početak	Kraj	Ukupno trajanje [h]	$V_{sr10}$ [m s <sup>-1</sup> ]	$V_{sr22}$ [m s <sup>-1</sup> ]	$V_{sr40}$ [m s <sup>-1</sup> ]	$V_{max10}$ [m s <sup>-1</sup> ]	$V_{max22}$ [m s <sup>-1</sup> ]	$V_{max40}$ [m s <sup>-1</sup> ]
41	17.10.2010	20.10.2010	54	7,8	9,1	9,3	27,3	26,8	26,2
42	20.10.2010	21.10.2010	17	3,8	4,3	4,4	12,5	12,6	12,5
43	21.10.2010	22.10.2010	14	3,6	4,1	4,5	10,5	9,5	9,0
44	25.10.2010	28.10.2010	78	9,5	10,8	11,2	30,5	31,5	30,8
45	03.11.2010	04.11.2010	12	3,7	4,1	4,5	8,4	8,2	8,6
46	20.11.2010	20.11.2010	10	4,2	4,5	4,7	10,0	10,7	10,3
47	24.11.2010	25.11.2010	31	4,7	5,0	5,2	12,1	12,9	12,5
48	27.11.2010	28.11.2010	18	7,0	7,6	7,9	21,9	19,8	19,4
49	30.11.2010	30.11.2010	16	6,4	6,7	6,9	20,3	15,5	15,0
50	03.12.2010	04.12.2010	13	3,5	3,8	4,1	7,2	8,1	8,2
51	04.12.2010	04.12.2010	10	4,9	5,4	5,4	12,3	12,4	12,3
52	04.12.2010	05.12.2010	11	3,0	3,5	3,7	9,1	9,4	10,1
53	09.12.2010	10.12.2010	15	11,6	13,2	14,4	32,6	31,9	33,8
54	12.12.2010	17.12.2010	113	8,6	9,5	10,2	31,0	29,3	27,8
55	18.12.2010	19.12.2010	14	3,5	3,9	4,3	9,9	10,6	11,6
56	20.12.2010	21.12.2010	13	2,3	2,6	3,0	6,6	6,9	7,6
57	25.12.2010	28.12.2010	65	6,6	7,1	7,5	26,0	27,8	26,9
58	30.12.2010	31.12.2010	13	2,2	2,5	2,9	5,4	5,2	5,4
59	02.01.2011	04.01.2011	44	8,0	8,5	9,2	30,1	27,2	27,3
60	04.01.2011	05.01.2011	11	3,4	3,7	4,1	7,8	8,6	8,2
61	11.01.2011	12.01.2011	11	2,6	2,8	3,1	6,1	6,7	6,8
62	12.01.2011	13.01.2011	14	3,7	4,2	4,5	10,3	11,2	11,3
63	20.01.2011	25.01.2011	117	11,2	11,8	12,1	40,9	36,7	35,2
64	26.01.2011	27.01.2011	16	6,9	7,3	7,5	16,2	13,8	13,7
65	27.01.2011	29.01.2011	45	8,5	8,7	9,0	17,8	16,3	15,9
66	29.01.2011	30.01.2011	13	4,7	5,0	5,2	9,8	9,8	9,6
67	31.01.2011	31.01.2011	13	5,3	5,6	5,8	11,6	12,7	10,9
68	01.02.2011	02.02.2011	13	2,5	2,9	3,3	6,4	7,0	7,1
69	02.02.2011	03.02.2011	28	10,2	11,2	11,6	23,5	24,0	23,9
70	03.02.2011	04.02.2011	27	8,5	9,7	10,3	26,3	26,9	25,9
71	06.02.2011	07.02.2011	13	2,1	2,5	2,9	5,4	6,0	6,7
72	09.02.2011	10.02.2011	15	3,8	4,2	4,5	11,0	11,2	11,1
73	17.02.2011	18.02.2011	15	5,2	5,5	5,8	12,9	13,3	12,9
74	18.02.2011	20.02.2011	43	8,2	9,1	9,8	20,8	21,5	20,7
75	21.02.2011	26.02.2011	127	11,4	12,6	13,1	31,9	33,0	32,0
76	28.02.2011	01.03.2011	13	7,5	8,2	8,6	15,0	15,8	14,8
77	02.03.2011	03.03.2011	12	7,0	7,6	8,2	14,7	15,6	14,6
78	03.03.2011	04.03.2011	15	5,8	6,2	6,3	13,4	13,3	14,0
79	04.03.2011	05.03.2011	19	3,7	4,1	4,3	9,1	9,9	8,6
80	06.03.2011	08.03.2011	46	11,7	13,3	14,5	35,8	37,1	34,8

Tablica 8: Nastavak

#	Početak	Kraj	Ukupno trajanje [h]	$V_{sr10}$ [m s <sup>-1</sup> ]	$V_{sr22}$ [m s <sup>-1</sup> ]	$V_{sr40}$ [m s <sup>-1</sup> ]	$V_{max10}$ [m s <sup>-1</sup> ]	$V_{max22}$ [m s <sup>-1</sup> ]	$V_{max40}$ [m s <sup>-1</sup> ]
81	08.03.2011	09.03.2011	24	7,1	7,8	8,1	24,3	23,8	24,4
82	18.03.2011	22.03.2011	84	10,9	12,0	13,0	27,4	28,3	28,5
83	22.03.2011	23.03.2011	17	5,9	6,8	7,1	16,7	16,0	15,9
84	23.03.2011	23.03.2011	10	4,4	5,0	5,4	14,2	15,4	15,5
85	23.03.2011	24.03.2011	19	7,3	8,2	8,6	18,6	19,4	19,5
86	28.03.2011	29.03.2011	15	5,8	6,3	6,6	13,7	14,0	14,3
87	01.04.2011	02.04.2011	23	6,7	7,7	8,4	17,8	17,5	17,6
88	02.04.2011	03.04.2011	26	4,6	5,2	5,7	16,8	16,9	16,9
89	05.04.2011	06.04.2011	35	9,7	11,0	11,9	25,6	27,4	26,2
90	06.04.2011	07.04.2011	18	7,6	9,0	10,0	23,4	26,4	24,9
91	09.04.2011	10.04.2011	22	7,4	8,6	9,3	23,3	25,3	25,0
92	11.04.2011	12.04.2011	14	6,1	7,1	7,3	16,6	18,6	15,6
93	13.04.2011	13.04.2011	18	12,3	14,2	15,0	30,6	28,6	34,6
94	15.04.2011	17.04.2011	58	7,9	8,9	9,4	19,9	20,6	19,9
95	17.04.2011	18.04.2011	25	7,6	8,7	9,2	18,4	18,9	18,5
96	18.04.2011	19.04.2011	14	5,2	5,7	5,8	12,4	13,0	13,0
97	19.04.2011	20.04.2011	14	4,7	5,7	6,2	12,0	13,5	13,1
98	27.04.2011	28.04.2011	19	3,5	3,9	4,1	13,3	14,2	13,8
99	30.04.2011	01.05.2011	17	6,2	7,0	7,3	15,6	15,6	15,1
100	03.05.2011	03.05.2011	17	7,0	7,8	8,0	18,6	17,7	17,4
101	03.05.2011	06.05.2011	59	7,6	8,9	9,7	24,3	23,7	23,6
102	08.05.2011	10.05.2011	52	11,5	13,4	13,8	32,3	33,4	32,8
103	11.05.2011	12.05.2011	15	6,4	7,8	7,7	21,5	22,5	23,6
104	13.05.2011	14.05.2011	13	3,3	3,7	3,9	9,3	9,5	10,8
105	16.05.2011	18.05.2011	55	9,9	11,7	12,6	28,2	29,1	28,4
106	18.05.2011	19.05.2011	12	4,5	5,2	5,7	12,3	12,6	12,9
107	21.05.2011	22.05.2011	20	4,3	4,9	5,2	15,2	15,7	16,8
108	23.05.2011	24.05.2011	19	4,3	5,1	5,5	11,8	13,3	13,7
109	24.05.2011	26.05.2011	39	7,3	8,6	8,7	20,1	19,6	19,2
110	29.05.2011	29.05.2011	11	4,6	5,2	5,4	13,0	13,6	13,4
111	29.05.2011	30.05.2011	19	5,2	6,1	6,4	13,8	14,1	15,0
112	01.06.2011	02.06.2011	15	2,8	3,2	3,5	9,7	9,9	9,9
113	02.06.2011	03.06.2011	20	6,6	7,7	8,0	16,5	16,8	16,6
114	03.06.2011	04.06.2011	12	4,5	5,0	5,2	10,4	10,2	11,1
115	10.06.2011	11.06.2011	13	4,3	5,0	5,2	12,2	13,1	13,4
116	11.06.2011	12.06.2011	17	6,3	7,4	8,2	15,1	16,0	16,5
117	12.06.2011	13.06.2011	17	4,3	4,9	5,2	11,3	11,5	12,4
118	13.06.2011	14.06.2011	13	3,7	4,1	4,2	8,0	8,4	8,8
119	14.06.2011	15.06.2011	16	4,9	5,5	5,7	14,6	15,4	15,4

U ovom radu se smatra da je bura zimska ako se pojavi između 1. prosinca i 31. ožujka te da je ljetna ako se zabilježi u razdoblju od 1. lipnja do 30. rujna. Kao što je i bilo očekivano, zimske epizode bure općenito traju dulje i imaju veće usrednjene i maksimalne brzine vjetra od ljetnih epizoda. Epizoda bure #75 je epizoda najduljeg ukupnog trajanja od 127 h, tijekom epizode #63 vjetar je postigao najveće apsolutne vrijednosti brzina, a tijekom bure #93 zabilježene su najveće usrednjene vrijednosti brzine vjetra. Sve tri navedene epizode zabilježene su tijekom zime. Za analizu sezonske varijabilnosti značajki bure izabrane su tri ljetne epizode bure. To su epizoda bure #12 koja je bila najduža ljetna bura trajanja 66 h, zatim epizoda #24 kada je vjetar postigao najveće apsolutne vrijednosti brzina i #16 kada su zabilježene maksimalne usrednjene vrijednosti brzine vjetra.

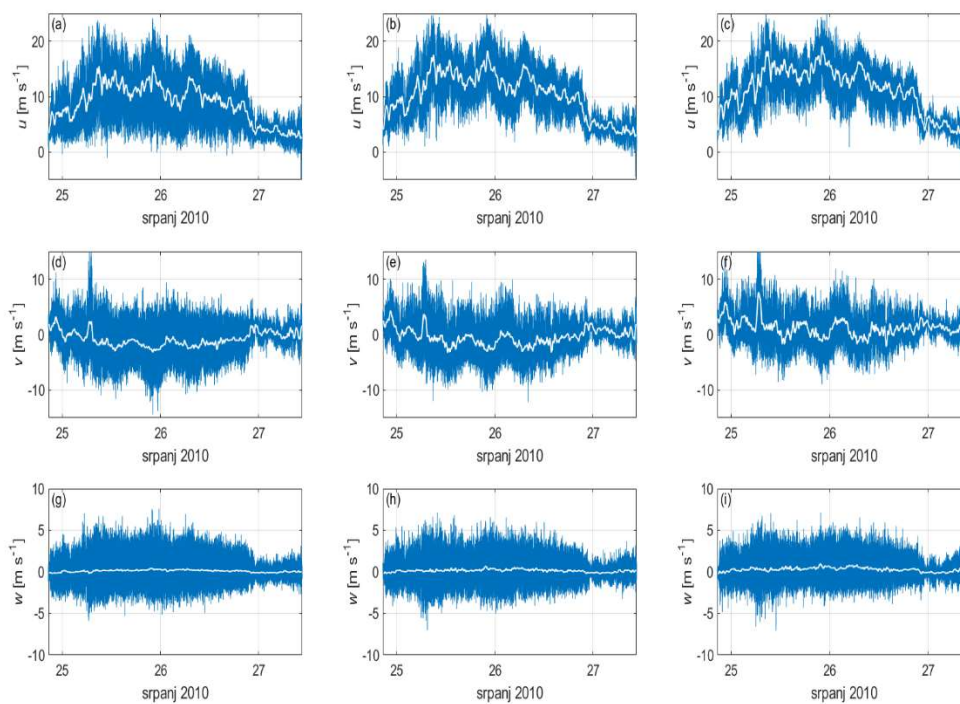
Bitno je primijetiti da je od ukupno 119 pojedinačnih epizoda bure, 60 puta (~50%) maksimalna zabilježena vrijednost brzine vjetra na 22 m bila veća od maksimalne zabilježene brzine vjetra na 40 m za pojedinu epizodu bure. Ukupno 37 puta (31%) maksimalna brzina vjetra na 10 m je bila veća od maksimalne brzine na 40 m, a 30 puta (25%) su maksimalne brzine bure i na 10 m i na 22 m bile veće od maksimalne brzine bure na 40 m visine. Moguće je da je uzrok tome što se s približavanjem tlu domena vertikalnih komponenti turbulentnih vrtloga smanjuje jer je jedna bitna površina (gornja) slobodna, a donja površina fizički ograničava tu karakterističnu integralnu duljinsku mjeru turbulencije. Ova pojava je nadomještena povećanjem integralnih duljinskih mjera turbulencije u  $x$ - i  $y$ -smjeru što rezultira lokalnim povećanjem brzine na nižim visinama, a da bi se na taj način zadovoljila lokalna bilanca očuvanja mase i količine gibanja. Slične značajke strujanja zabilježene su u prethodnim analizama integralnih duljinskih mjera turbulencije u zračnom tunelu za generiranje graničnog sloja sa zatvorenom ispitnom sekcijom, gdje su se integralne duljinske mjere turbulencije povećavale s udalžavanjem od podloge sve do određene visine od poda ispitne sekcije zračnog tunela, a iznad te pozicije su ostale konstantne s daljnjim povećanjem visine (Kozmar, 2010). Babić i sur. (2016) su proučavajući vertikalne turbulentne tokove tijekom 17 izabranih zimskih epizoda jake bure na podacima s Pometenog brda otkrili da su turbulentni tokovi najizraženiji na 22 m što su povezali s postojanjem najveće mahovitosti vertikalne komponente vjetra na visini od 22 m.



## 4 REZULTATI I DISKUSIJA

### 4.1 Termička stratifikacija niže troposfere tijekom bure

Preliminarni proračuni provedeni su na temelju jedne odabrane ljetne epizode bure #16 koja je trajala ukupno 62 h u vremenskom razdoblju od 24. do 27. srpnja 2010. godine. Karakterizira je maksimalna usrednjena vrijednost brzine vjetra s obzirom na druge zabilježene ljetne epizode bure, a satne usrednjene vrijednosti brzine vjetra bile su veće od 15 m/s. Na Slici 8 dan je prikaz izvornih izmjerenih podataka i kliznih usrednjenih vrijednosti brzina s periodom usrednjavanja od 17 min.

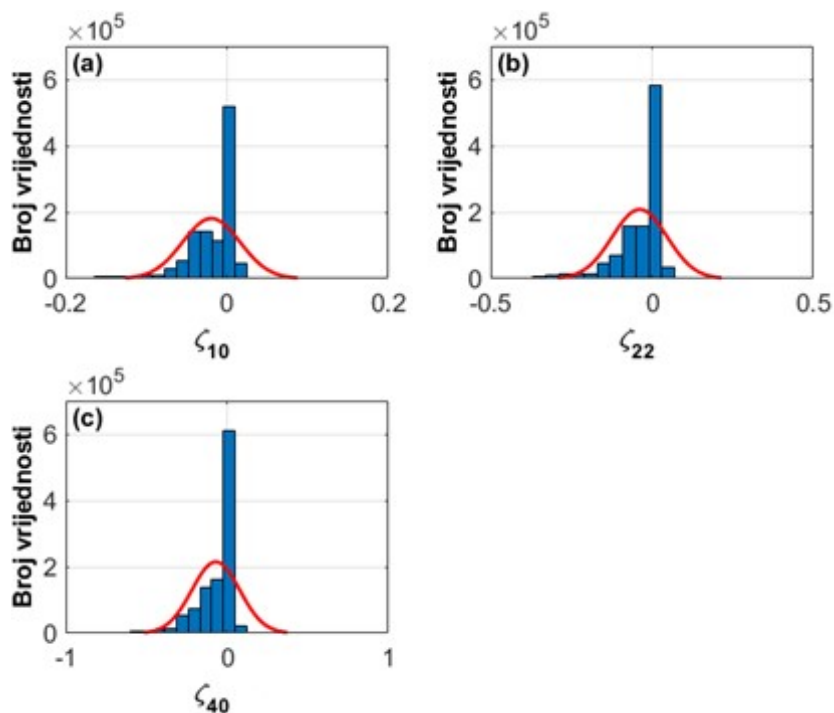


Slika 8: Izvorni podaci (plava krivulja), klizne usrednjene vrijednosti brzine s periodom usrednjavanja 17 min (bijela krivulja) na visini 10 m (lijevo), 22 m (sredina) i 40 m (desno) izmjerene na meteorološkom tornju na lokaciji Pometeno brdo; longitudinalna ( $u$ ), lateralna ( $v$ ) i vertikalna ( $w$ ) komponenta brzine vjetra izmjerena od 24. do 27. srpnja 2010. prikazano u koordinatnom sustavu s  $x$ -osi duž glavnog smjera bure.

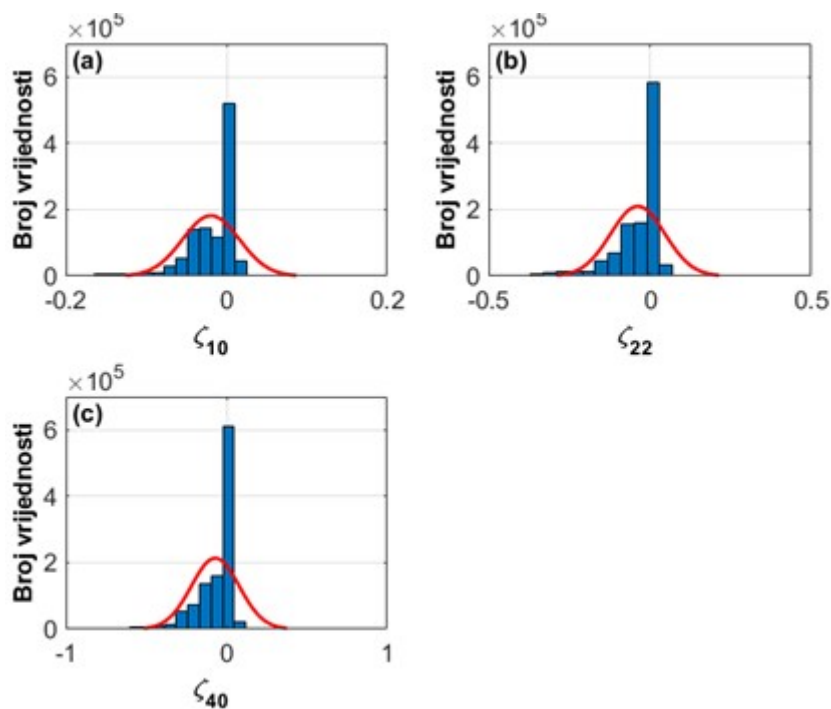
Kako bi se ispitala hipoteza o približno neutralnoj termičkoj stratifikaciji niže troposfere za vrijeme bure izračunat je parametar termičke stabilnosti,  $\zeta$ , korištenjem izraza (1). Na Slikama 9 i 10 prikazan je parametar termičke stabilnosti uz prilagođenu normalnu raspodjelu. Obukhovljeva duljina izračunata je na dva načina: 1) korištenjem konstantne usrednjene vrijednosti mjerene ultrasonične temperature i 2) proračunom u kojem je usrednjena vrijednost

ultrasonične temperature dobivena usrednjavanjem mjerene ultrasonične temperature periodom usrednjavanja od 17 min. Turbulentni tok topline izračunat je na temelju tih temperatura. Isti proračuni provedeni su korištenjem konstantne usrednjene vrijednosti mjerene ultrasonične temperature za cijelo trajanje epizode bure i korištenjem usrednjene vrijednosti mjerene ultrasonične temperature izračunate za svaku točku mjerenja posebno. Kao što je vidljivo sa Slike 11 dobiveni su vrlo slični rezultati za ta dva slučaja. Dobiveni rezultati bliski su vrijednosti nula što upućuje da je promatrana epizoda bure bila približno neutralno termički stratificirana.

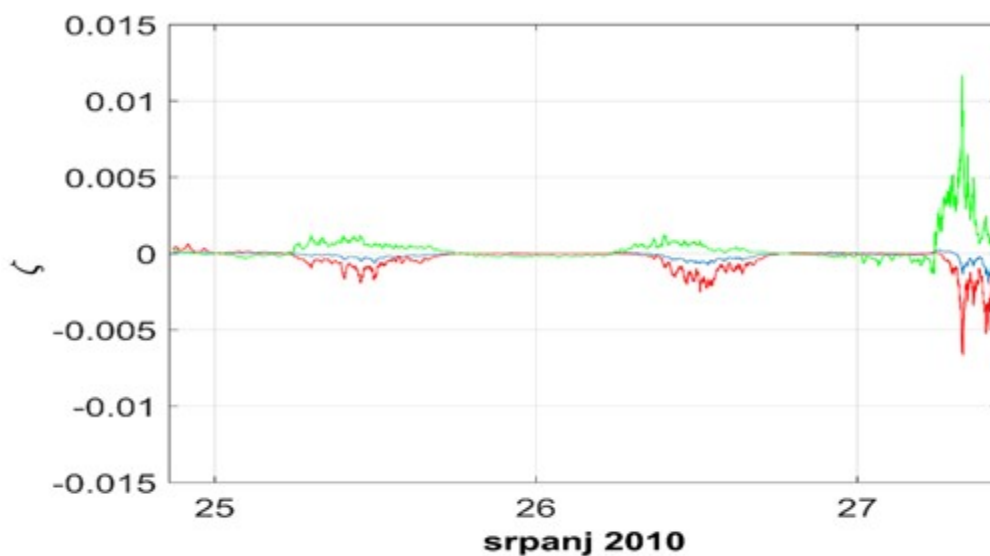
Analiziran je mogući utjecaj termičke stratifikacije na vertikalne profile brzine bure pri izmjeni dana i noći. Vremenski nizovi parametra stabilnosti na tri visine prikazani su na Slikama 12 i 13. Tijekom dana zbog Sunčevog zagrijavanja površine Zemlje dominira termički inducirana turbulencija. Noću su temperatura tla, kao i pripadni vertikalni turbulentni tokovi kinematičke topline, i zraka blizu tla skoro jednaki te dominira mehanički inducirana turbulencija, a parametar stabilnosti poprima vrijednosti približno jednake nuli. Eksperimentalni podaci pokazuju umjerenu varijaciju parametra stabilnosti tijekom dana između 07:00 i 19:00 h uzrokovanu termički induciranim gibanjima u atmosferi koja su uglavnom slaba tijekom noći kada je parametar stabilnosti približno jednak nuli. Pri kraju analizirane epizode bure kada su zabilježene manje brzine vjetera, atmosfera je termički nestabilna s negativnim vrijednostima parametra termičke stabilnosti jer tada termički efekti postaju izraženiji. Bitno je napomenuti da ne postoji korelacija trendova atmosferske statičke stabilnosti tijekom dana i noći (Slike 12 (b)-(d) i 13 (b)-(d) ) i trendova usrednjene vrijednosti brzine vjetera (Slike 12 (a) i 13 (a)). To potvrđuje da termička stratifikacija atmosfere nema značajan utjecaj na dobivene trendove vrijednosti eksponenta zakona potencije, brzine trenja i aerodinamičke duljine hrapavosti površine. Nadalje, time je potvrđena hipoteza o približno neutralnoj termičkoj stratifikaciji bure u donjoj troposferi (Lepri i sur., 2014).



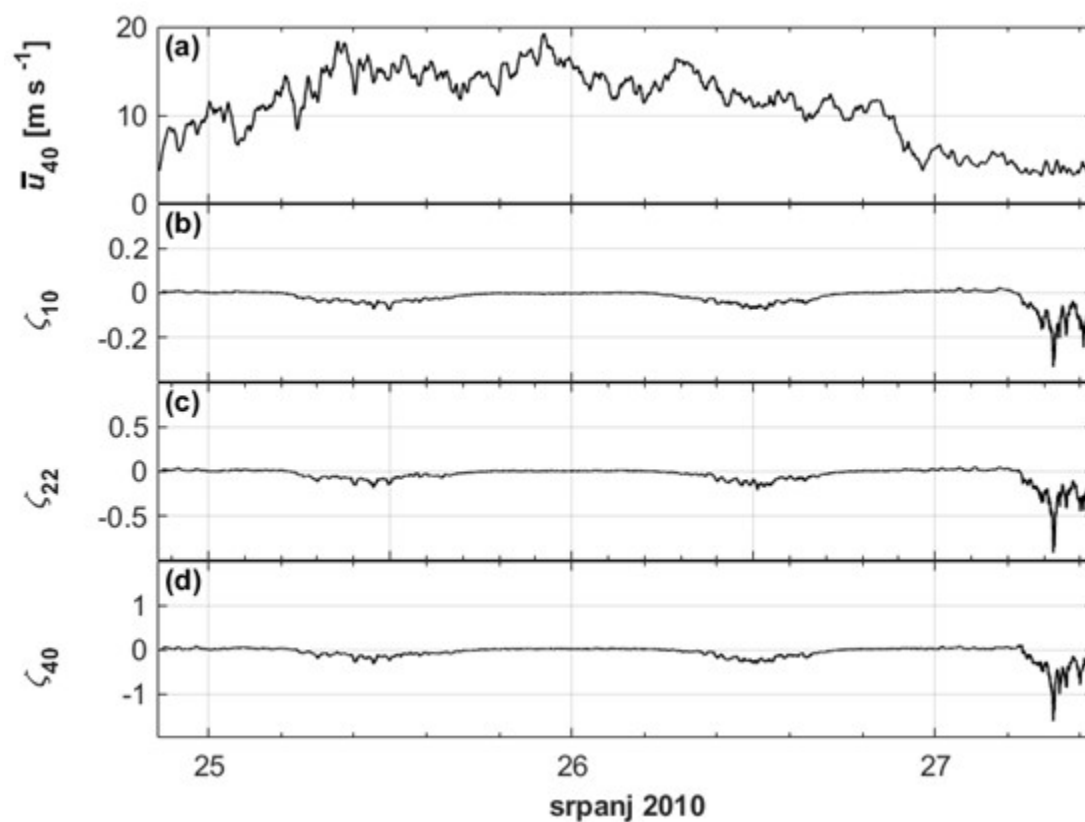
Slika 9: Broj vrijednosti parametra termičke (statičke) stabilnosti s normalnom raspodjelom na visini (a) 10 m, (b) 22 m i (c) 40 m. Parametar stabilnosti računani je preko izraza (1) korištenjem konstantne usrednjene vrijednosti mjerene ultrasonične temperature.



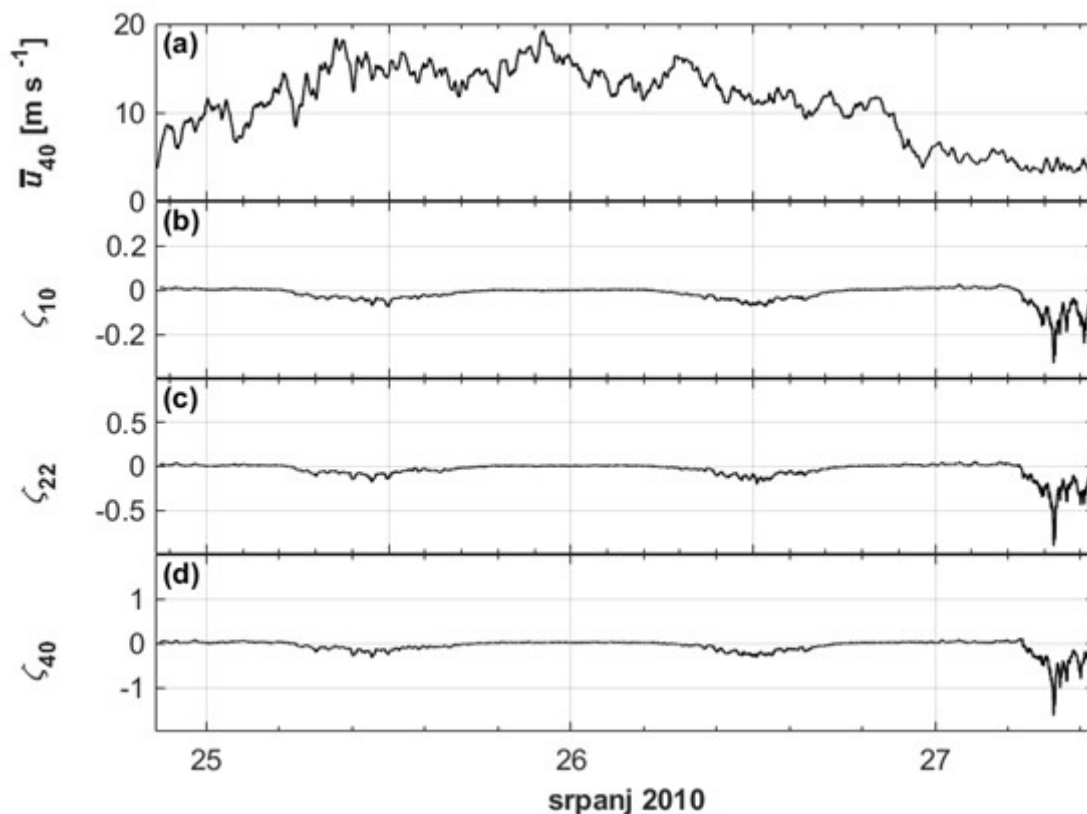
Slika 10: Broj vrijednosti parametra termičke (statičke) stabilnosti s normalnom raspodjelom na visini (a) 10 m, (b) 22 m i (c) 40 m. Parametar stabilnosti računani je preko izraza (1) korištenjem usrednjene vrijednosti mjerene ultrasonične temperature izračunate za svaku točku mjerenja posebno.



Slika 11: Razlika vrijednosti parametra termičke (statičke) stabilnosti računatog na dva načina. Legenda: plava krivulja – 10 m, zelena krivulja – 22 m, plava krivulja – 40 m.

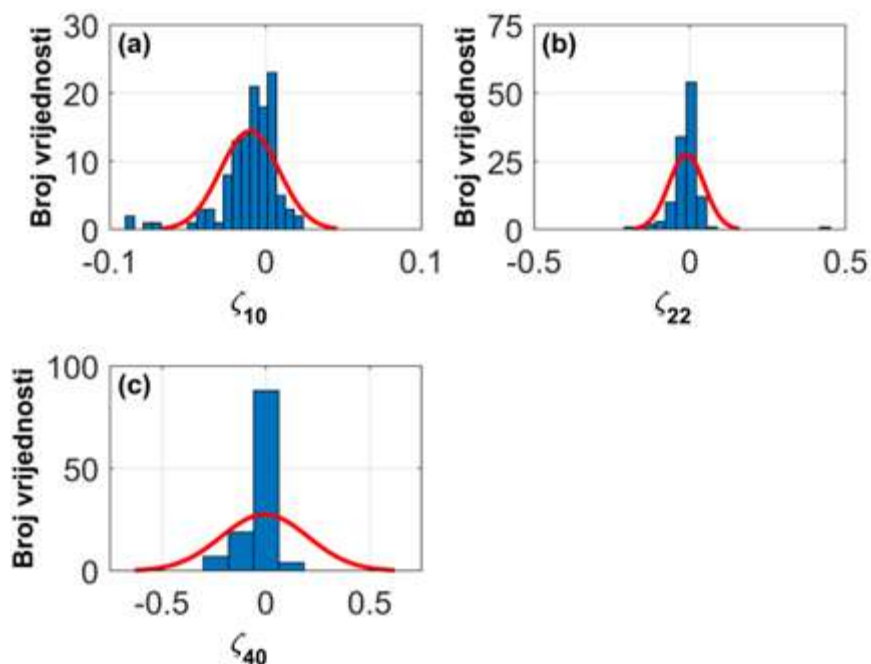


Slika 12: Vremenski niz (a) klizne usrednjene vrijednosti brzine vjetra s periodom usrednjavanja 17 min na visini 40 m, (b) parametra termičke (statičke) stabilnosti na visini 10 m, (c) 22 m i (d) 40 m. Parametar stabilnosti izračunat je korištenjem konstantne usrednjene vrijednosti mjerene ultrasonične temperature.



Slika 13: Vremenski niz (a) klizne usrednjene vrijednosti brzine vjetra s periodom usrednjavanja 17 min na visini 40 m, (b) parametra termičke (statičke) stabilnosti na visini 10 m, (c) 22 m i (d) 40 m. Parametar stabilnosti izračunat je korištenjem usrednjene vrijednosti mjerene ultrasonične temperature izračunate za svaku točku mjerenja posebno.

Kako bi se istražilo važe li trendovi koji vrijede za ljetnu epizodu bure #16 i za ostalih 118 analiziranih epizoda bure, proračuni parametra termičke stabilnosti ponovljeni su za svaku pojedinu epizodu. Usrednjene vrijednosti parametra termičke stabilnosti za svaku epizodu bure s odgovarajućom normalnom raspodjelom prikazane su na Slici 14. Obukhovljeva duljina izračunata je zasebno za svaku epizodu preko turbulentnog toka topline koji je računat korištenjem konstantne usrednjene vrijednosti mjerene ultrasonične temperature. Budući da su usrednjene vrijednosti parametra termičke stabilnosti za sve analizirane epizode bure približno jednake nuli može se zaključiti da je niža troposfera tijekom bure bila približno neutralno termički stratificirana (Lepri i sur., 2017).



Slika 14: Broj usrednjenih vrijednosti parametra termičke (statičke) stabilnosti s normalnom raspodjelom na visini (a) 10 m, (b) 22 m i (c) 40 m.

## 4.2 Vertikalni profil usrednjene vrijednosti brzine vjetra

Preliminarni proračuni i analize provedeni su na temelju ljetne epizode bure #16. Za istraživanje primjenjivosti zakona potencije i logaritamskog zakona za proračun profila bure podaci su prilagođeni odgovarajućem koordinatnom sustavu. Budući da je usrednjena vrijednost smjera brzine vjetra na 10 m  $\approx 54^\circ$ , na 22 m  $\approx 51^\circ$  i na 40 m  $\approx 43^\circ$ , linearno interpolirana usrednjena vrijednost smjera brzine vjetra na 25 m, što je usrednjena vrijednost visine između 10 m i 40 m, iznosi  $49^\circ$ . Stoga su izvorni podaci za dvije horizontalne komponente brzine rotirani za  $221^\circ$  u smjeru suprotnom od kazaljke na satu. Slika 8 prikazuje izvorne podatke za sve tri komponente brzine u novom koordinatnom sustavu s  $x$ -osi usmjerenom duž usrednjenog smjera bure.

Istraživanje prikladnosti zakona potencije mjerenim vrijednostima provedena je prilagodbom mjerenih vrijednosti na zakon potencije i proračunom vrijednosti eksponenta zakona potencije. Kako bi se istražio utjecaj izbora referentne visine na krajnji rezultat, dodatno su provedeni posebni proračuni za slučajeve kada je referentna visina 10 m, 22 m i 40 m, no oni su pokazali da izbor referentne visine nema utjecaj na krajnji rezultat te stoga ovaj aspekt nije dalje razmatran u radu.

U Tablicama od 9 do 13 prikazani su osnovni statistički parametri eksponenta zakona potencije,  $\alpha$ , brzine trenja,  $u_*$  i aerodinamičke duljine hrapavosti površine,  $z_0$  za ljetnu epizodu bure #16. Da bi se istražila ovisnost navedenih parametara o usrednjenjivosti vrijednosti brzine vjetrova, na Slikama 22 do 25 prikazan je vremenski niz usrednjenih vrijednosti brzine vjetrova i parametara  $\alpha$ ,  $u_*$  i  $z_0$ .

Tablica 9: Statistički podaci za eksponent zakona potencije,  $\alpha$ , za različite vrijednosti perioda usrednjavanja;  $r^2$  je kvadrat koeficijenta korelacije za ljetnu buru #16

Statistički parametar	Period usrednjavanja			
	5 min	8 min	17 min	20 min
<b>Medijan</b>	0,165	0,165	0,164	0,165
<b>Aritmetička sredina</b>	0,172	0,172	0,172	0,172
<b>Minimalna vrijednost</b>	0,000	0,009	0,067	0,072
<b>Maksimalna vrijednost</b>	0,446	0,382	0,364	0,345
<b>Standardna devijacija</b>	0,058	0,053	0,046	0,045
$r^2$	0,936	0,943	0,952	0,953

U Tablici 9 dani su statistički podaci za parametar  $\alpha$  za različite vrijednosti perioda usrednjavanja. Za sve periode usrednjavanja, vrijednost aritmetičke sredine za eksponent zakona potencije iznosi 0,172 što ukazuje na robusnost ovog parametra u odnosu na promjenu perioda usrednjavanja. Ta vrijednost se relativno dobro podudara s medijanom koji iznosi 0,165 što upućuje na činjenicu da eksponent zakona potencije za različite vrijednosti perioda usrednjavanja slijedi normalnu raspodjelu. Budući da terenska mjerenja mogu trajati dulji period vremena, npr. nekoliko dana, mjeseci, čak i godina, moguća je pojava vremenskog pomaka mjerene vrijednosti zbog prirodnih varijacija pozadinskog toka. Na temelju navedenog preporučuje se medijan za primjenu kao prikladniji statistički parametar za opis dominantnih vrijednosti (Lepri i sur., 2014). Iz istog razloga je i raspon između minimalne i maksimalne vrijednosti parametra  $\alpha$  manji kod duljih perioda usrednjavanja. Za razliku od mjerenja u prirodi, kod laboratorijskih aerodinamičkih mjerenja npr. u zračnom tunelu vremenski nizovi podataka najčešće nisu duži od nekoliko min zbog čega su podaci normalno raspršeni oko konstantnih vrijednosti - turbulentno kvazistacionarno strujanje.

Standardna devijacija, koja označava mjeru raspršenosti podataka oko usrednjene ili očekivane vrijednosti (npr., Wilks, 1995), za parametar  $\alpha$  iznosi najviše 0,058, a najmanje 0,045 što ukazuje da su izračunate vrijednosti umjereno raspršene oko usrednjene vrijednosti.

Vrijednosti kvadrata koeficijenta korelacije,  $r^2$ , koji ukazuje na podudarnost zakona potencije s izmjerenim vrijednostima, ne mijenjaju se značajno s promjenom perioda usrednjavanja. Budući da su vrijednosti  $r^2$  u rasponu 0,936 do 0,953, može se zaključiti da zakon potencije dobro opisuje vertikalni profil brzine bure u površinskom sloju atmosfere. Procijenjena usrednjena vrijednost eksponenta zakona potencija vrijednosti 0,17 blizu je vrijednostima navedenim u ESDU85020 (1985) koje odgovaraju terenu u predgrađima manjih gradova, selima, seoskim krajevima s dosta vegetacije uz poneko stablo i zgradu (Tablica 1).

Tablica 10: Statistički podaci za brzinu trenja bure,  $u_*$ , za različite vrijednosti perioda usrednjavanja dobiveni na temelju prilagodbe podataka logaritamskom zakonu;  $r^2$  je kvadrat koeficijenta korelacije za ljetnu buru #16

Statistički parametar	Period usrednjavanja			
	5 min	8 min	17 min	20 min
<b>Medijan [m s<sup>-1</sup>]</b>	0,706	0,713	0,723	0,725
<b>Aritmetička sredina [m s<sup>-1</sup>]</b>	0,691	0,692	0,693	0,694
<b>Minimalna vrijednost [m s<sup>-1</sup>]</b>	0,000	0,011	0,076	0,093
<b>Maksimalna vrijednost [m s<sup>-1</sup>]</b>	1,846	1,764	1,595	1,563
<b>Standardna devijacija [m s<sup>-1</sup>]</b>	0,318	0,306	0,292	0,290
<b><math>r^2</math></b>	0,940	0,948	0,957	0,959

Tablica 11: Statistički podaci za brzinu trenja bure,  $u_*$ , za različite vrijednosti perioda usrednjavanja dobiveni korištenjem izraza (55) za ljetnu buru #16.

Statistički parametar	Period usrednjavanja			
	5 min	8 min	17 min	20 min
<b>Medijan [m s<sup>-1</sup>]</b>	0,696	0,704	0,713	0,716
<b>Aritmetička sredina [m s<sup>-1</sup>]</b>	0,684	0,684	0,685	0,686
<b>Minimalna vrijednost [m s<sup>-1</sup>]</b>	0,000	0,005	0,070	0,089
<b>Maksimalna vrijednost [m s<sup>-1</sup>]</b>	1,826	1,739	1,568	1,536
<b>Standardna devijacija [m s<sup>-1</sup>]</b>	0,318	0,306	0,292	0,289

U Tablicama 10 - 13 prikazani su statistički podaci za brzinu trenja,  $u_*$ , i aerodinamičke duljine hrapavosti površine,  $z_0$ , za vrijednosti perioda usrednjavanja od 5 do 20 min. Iz podataka u Tablicama 10 i 11 se može zaključiti da su usrednjene vrijednosti brzine trenja,  $u_*$ , računane na dva načina, i to prilagodbom mjerenih vrijednosti na logaritamski zakon i uz korištenje izraza ( 55 ), približno jednake i ne ovise o izboru perioda usrednjavanja (Lepri i sur. 2014). To je



najvjerojatnije posljedica slabe, približno neutralno termički stratificirane donje troposfere tijekom olujnih i orkanskih epizoda bure. U svim razmatranim slučajevima aritmetička sredina vrijednosti brzine trenja iznosi približno  $0,69 \text{ m s}^{-1}$  iz čega proizlazi da je  $u_*$  kao i parametar  $\alpha$  robustan u odnosu na izbor vrijednosti perioda usrednjavanja. Vrijednosti medijana  $u_*$  od  $\sim 0,70 \text{ m s}^{-1}$  približno su jednake odgovarajućim usrednjenim vrijednostima što upućuje da su mjereni podaci u skladu s normalnom raspodjelom. Sukladno predviđanjima, raspon se između minimalne i maksimalne vrijednosti smanjuje s većim periodom usrednjavanja. Standardna devijacija vrijednosti brzine trenja u oba slučaja je u rasponu između  $0,290 \text{ m s}^{-1}$  i  $0,318 \text{ m s}^{-1}$  (Tablice 10 i 11) što upućuje na značajnu, ali još uvijek prihvatljivu raspršenost  $u_*$  s obzirom na pripadajuće usrednjene vrijednosti.

Tablica 12: Statistički podaci za aerodinamičku duljinu hrapavosti,  $z_0$  pri različitim vrijednostima perioda usrednjavanja dobiveni na temelju prilagodbe podataka logaritamskom zakonu;  $r^2$  je kvadrat koeficijenta korelacije za ljetnu buru #16.

Statistički parametar	Period usrednjavanja			
	5 min	8 min	17 min	20 min
<b>Medijan [m]</b>	0,043	0,042	0,041	0,041
<b>Aritmetička sredina [m]</b>	0,120	0,109	0,098	0,095
<b>Minimalna vrijednost [m]</b>	0,000	0,000	0,000	0,000
<b>Maksimalna vrijednost [m]</b>	1,887	1,410	1,232	1,058
<b>Standardna devijacija [m]</b>	0,186	0,163	0,135	0,134
<b><math>r^2</math></b>	0,940	0,948	0,957	0,959

Tablica 13: Statistički podaci za aerodinamičku duljinu hrapavosti,  $z_0$  pri različitim vrijednostima perioda usrednjavanja dobiveni korištenjem izraza (56) za ljetnu buru #16.

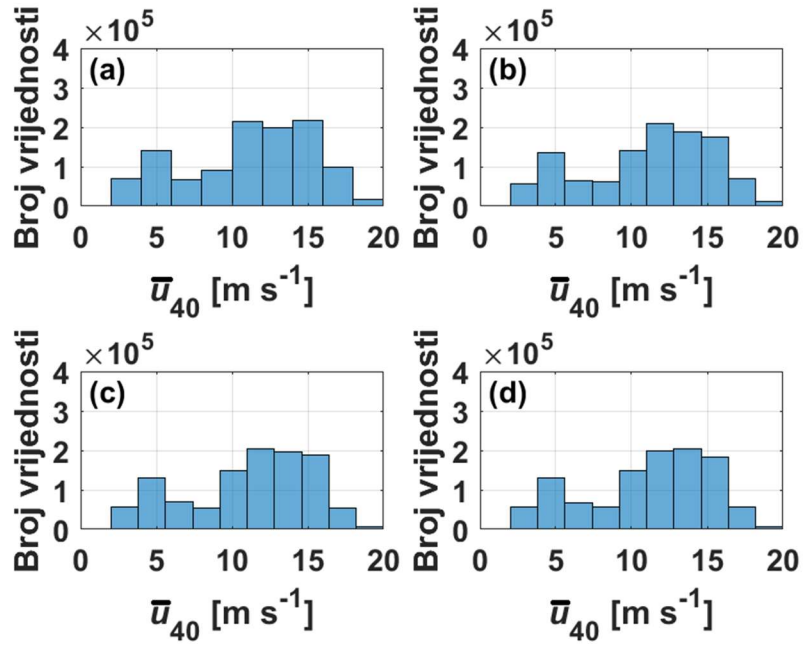
Statistički parametar	Period usrednjavanja			
	5 min	8 min	17 min	20 min
<b>Medijan [m]</b>	0,042	0,041	0,041	0,041
<b>Aritmetička sredina [m]</b>	0,119	0,109	0,097	0,095
<b>Minimalna vrijednost [m]</b>	0,000	0,000	0,000	0,000
<b>Maksimalna vrijednost [m]</b>	1,887	1,381	1,212	1,044
<b>Standardna devijacija [m]</b>	0,186	0,163	0,139	0,134

Prethodno je pokazano da parametri  $\alpha$  i  $u_*$  ne ovise o izboru perioda usrednjavanja, dok zabilježene vrijednosti parametra  $z_0$  ukazuju na bitno drugačije značajke budući da su vrijednosti  $z_0$  u rasponu od  $0,095 \text{ m}$  do  $0,120 \text{ m}$  kada se računa prilagodbom podataka na

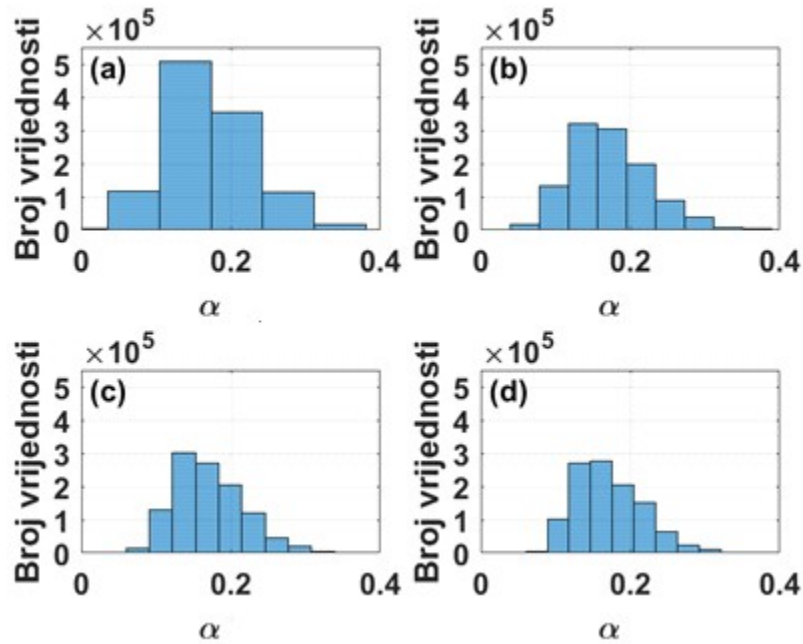
logaritamski zakon te od 0,095 m do 0,119 m kada su proračuni provedeni na temelju izraza (56), Tablice 12 i 13. Značajan iznos standardne devijacije između 0,134 m i 0,186 m ukazuje na veliku raspršenost podataka, no  $r^2$  s vrijednostima između 0,940 i 0,959 ukazuje na zadovoljavajuću primjenjivost logaritamskog zakona na izmjerene podatke. Postignute vrijednosti aritmetičke sredine za  $z_0$  su približno 2,5 puta veće od odgovarajućih medijana što ukazuje na raspodjelu podataka koja ne odgovara normalnoj raspodjeli. Ovo saznanje je temelj zaključka da je robusniji medijan, koji je približno konstantan za sve periode usrednjavanja, prikladniji parametar za određivanje  $z_0$  u odnosu na aritmetički usrednjenu vrijednost (Lepri i sur., 2014). Postignute vrijednosti  $z_0$  odgovaraju predgrađima manjih gradova, selima, ruralnim područjima s dosta vegetacije uz poneka stabla i zgrade, preporučenim u ESDU85020 (1985), dok medijan koji je postigao manje vrijednosti  $z_0$  u odnosu na aritmetičku sredinu odgovara značajkama ruralnijeg terena, Tablica 1.

Kako bi se jasnije dala raspodjela podataka tijekom 62 h mjerenja, na Slikama 15 - 20 dan je prikaz zabilježenog broja uzoraka parametara  $\alpha$ ,  $u_*$  i  $z_0$  tijekom razdoblja mjerenja za različite periode usrednjavanja. Grafički prikaz potvrđuje da su za sve analizirane parametre trendovi jednaki neovisno o periodu usrednjavanja. Značajke parametara  $u_*$  i  $z_0$  su vrlo slične za oba načina proračuna, putem prilagodbe logaritamskom zakonu i proračunu temeljem jednadžbi (55) i (56).

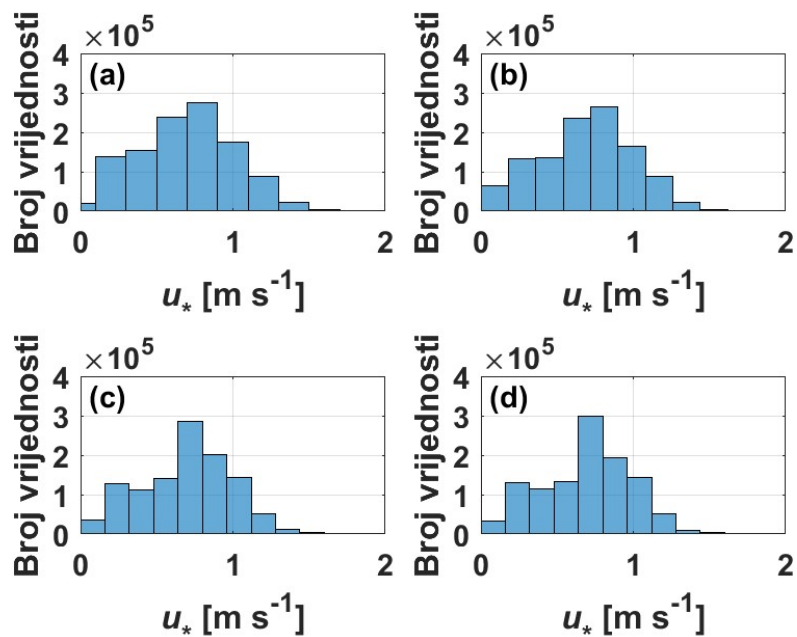
Eksponent zakona potencije i brzina trenja raspodijeljeni su sukladno raspodjeli sličnoj normalnoj raspodjeli, usrednjena vrijednost brzine bimodalnoj raspodjeli, a aerodinamička duljina hrapavosti površine raspodjeli sličnoj Poissonovoj razdiobi. Analizom sinoptičkih karata zabilježenih u vrijeme provedbe ovih mjerenja može se zaključiti da prva vršna vrijednost iznosi približno  $5 \text{ m s}^{-1}$  i odgovara kraju analizirane epizode bure kada je nestajao gradijent tlaka i vjetar. Vršne vrijednosti koje odgovaraju brzinama od  $11 \text{ m s}^{-1}$  do  $15 \text{ m s}^{-1}$  uzrokovane su jakim fluktuacijama bure s naizmjeničnim promjenama između udara i slabijih epizoda bure.



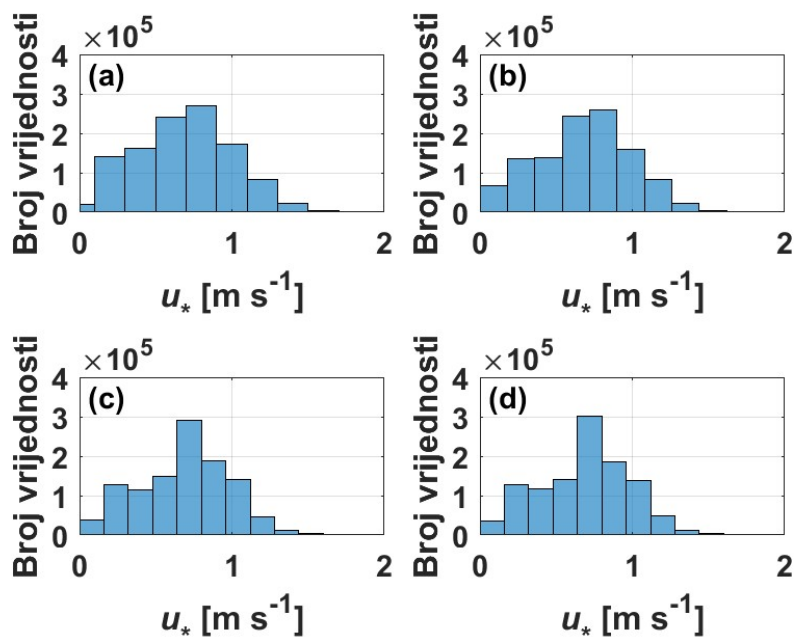
Slika 15: Broj kliznih usrednjenih vrijednosti brzine na visini 40 m pri periodu usrednjavanja (a) 5 min, (b) 8 min, (c) 17 min i (d) 20 min.



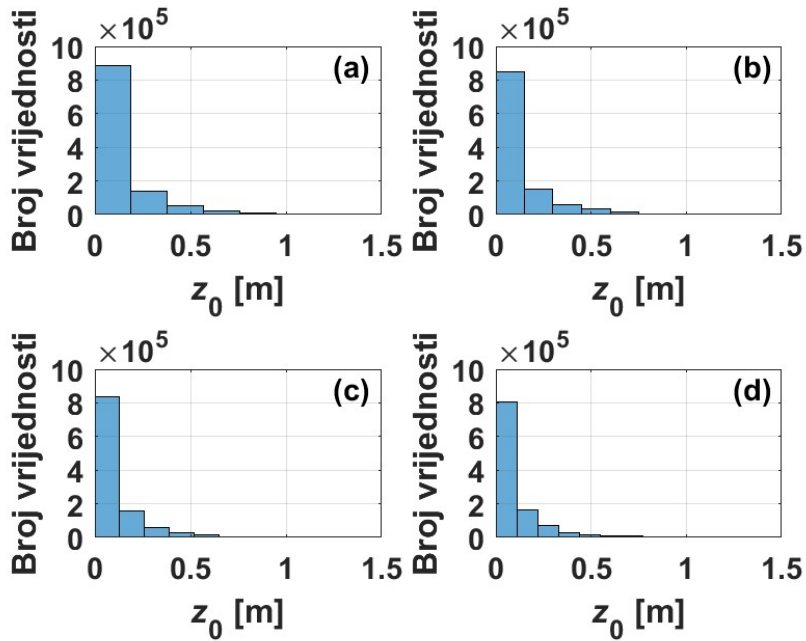
Slika 16: Broj kliznih usrednjenih vrijednosti eksponenta zakona potencija,  $\alpha$ , pri periodu usrednjavanja (a) 5 min, (b) 8 min, (c) 17 min i (d) 20 min.



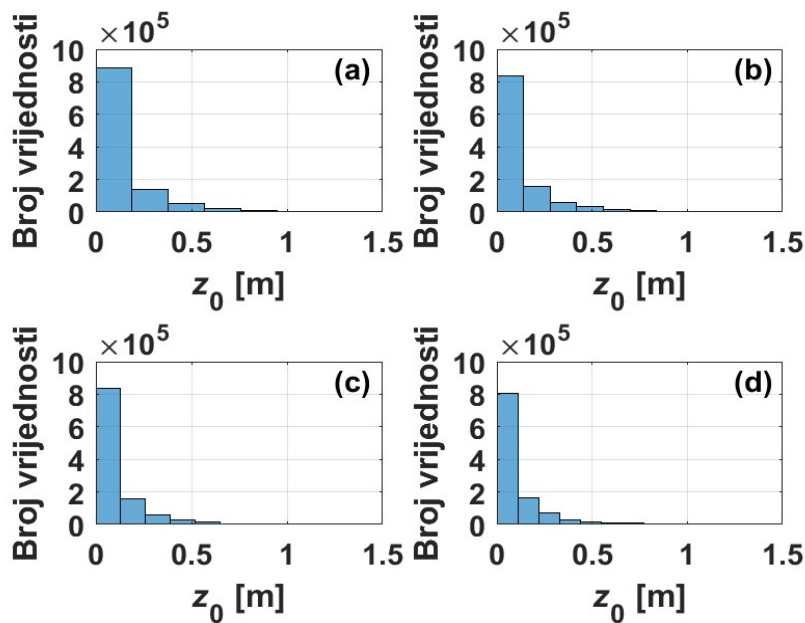
Slika 17: Broj kliznih usrednjenih vrijednosti brzine trenja  $u_*$  dobiven prilagodbom podataka na logaritamski zakon pri periodu usrednjavanja (a) 5 min, (b) 8 min, (c) 17 min i (d) 20 min.



Slika 18: Broj kliznih usrednjenih vrijednosti brzine trenja,  $u_*$ , dobiven korištenjem jednadžbe (55) pri periodu usrednjavanja (a) 5 min, (b) 8 min, (c) 17 min i (d) 20 min.



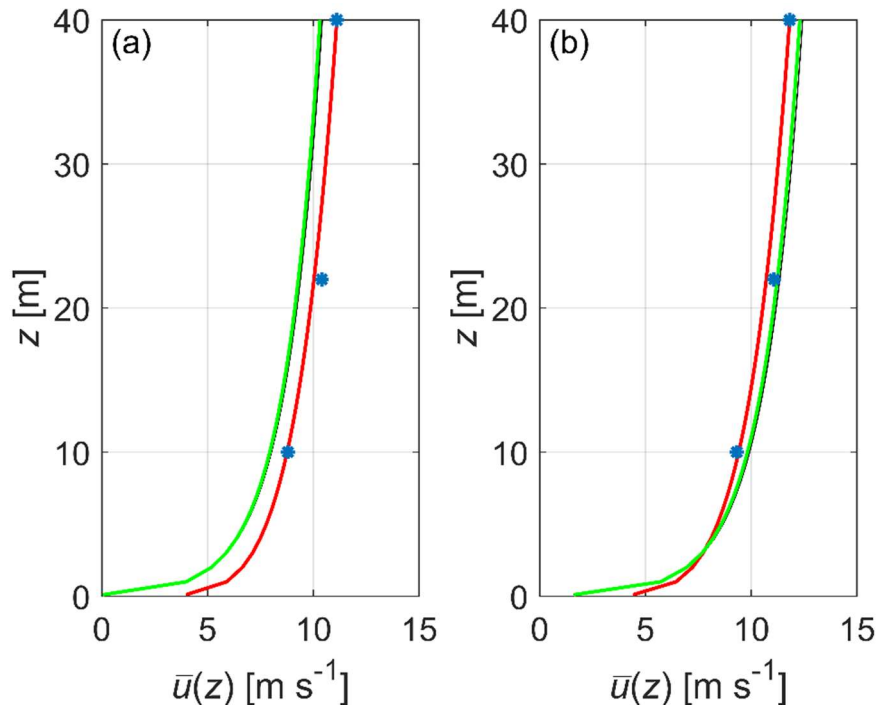
Slika 19: Broj kliznih usrednjenih vrijednosti aerodinamičke duljine hrapavosti,  $z_0$ , dobiven prilagodbom podataka na logaritamski zakon pri periodu usrednjavanja (a) 5 min, (b) 8 min, (c) 17 min i (d) 20 min.



Slika 20: Broj kliznih usrednjenih vrijednosti aerodinamičke duljine hrapavosti  $z_0$  dobiven korištenjem jednadžbe (56) pri periodu usrednjavanja (a) 5 min, (b) 8 min, (c) 17 min i (d) 20 min.

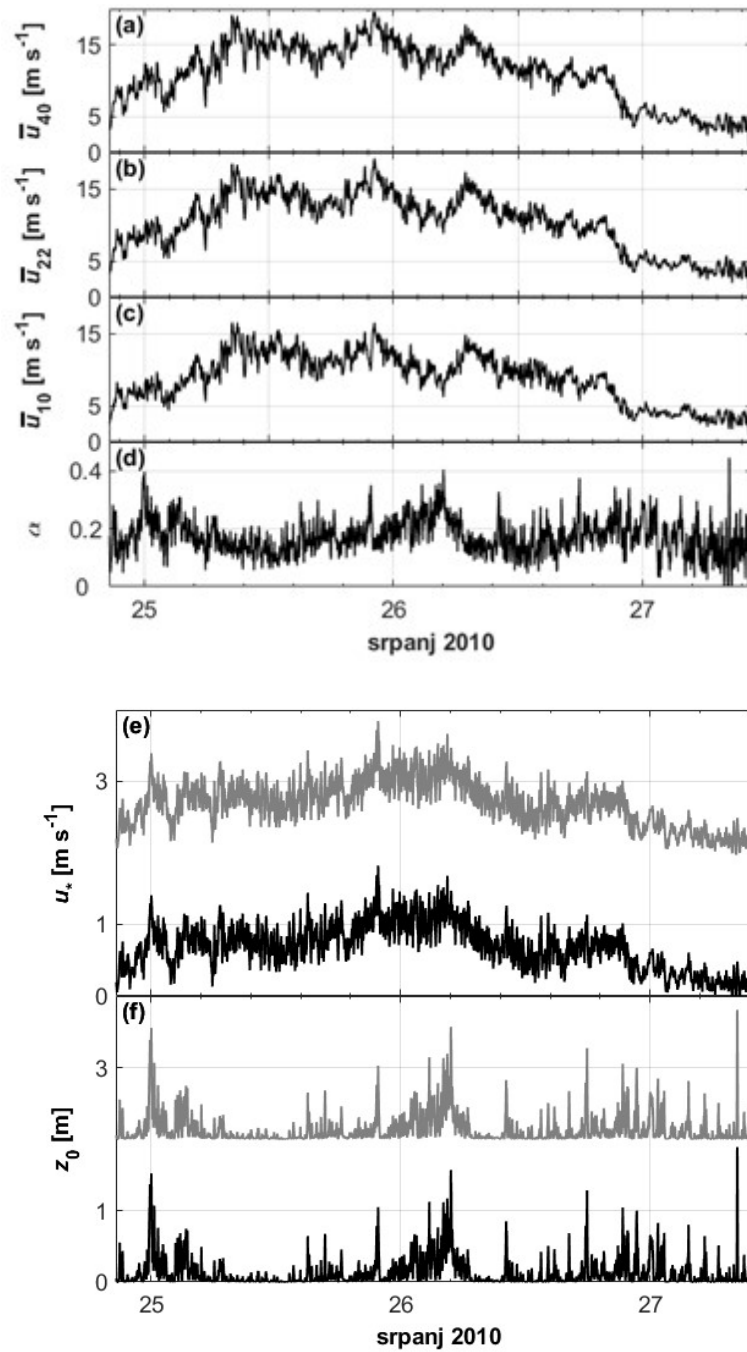
Na Slici 21 prikazana je usporedba izmjerenih vrijednosti u odnosu na vertikalne profile usrednjenih vrijednosti brzine proračunate korištenjem logaritamskog zakona i zakona potencije. Dobiveni rezultati ukazuju na činjenicu da zakon potencije i logaritamski zakon vrlo dobro opisuju vertikalne profile usrednjenih vrijednosti puhanja bure, što je posebno izraženo za dulje periode usrednjavanja (Lepri i sur., 2014). Za promatranu epizodu bure, logaritamski

zakon i zakon potencije u većoj su podudarnosti s izmjerenim podacima, ako je analiza provedena korištenjem medijana u odnosu na analizu korištenjem aritmetičke sredine zbog vremenskog pomaka parametra  $z_0$  tijekom mjerenja, Slika 21 (Lepri i sur., 2014).

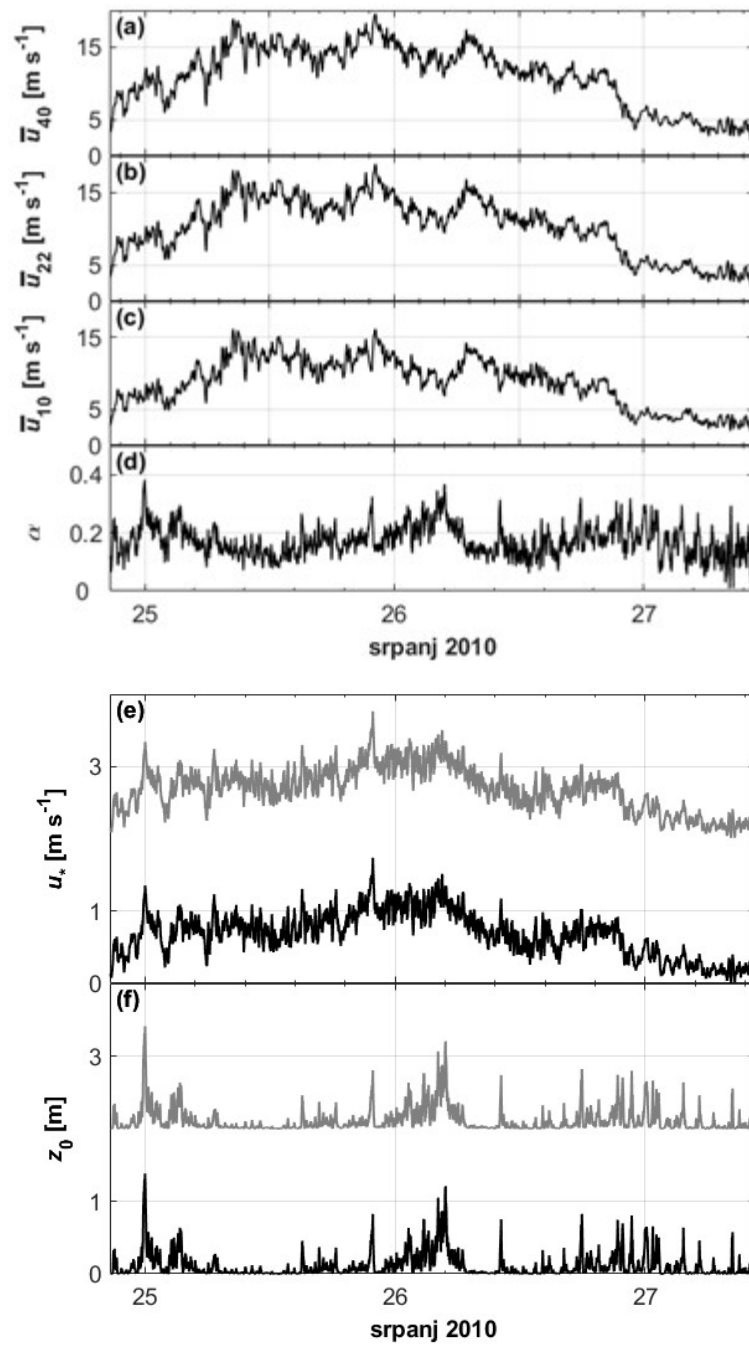


Slika 21: Vertikalni profil brzine bure; usporedba izmjerenih vrijednosti u odnosu na vertikalne profile usrednjenih vrijednosti brzine proračunate korištenjem logaritamskog zakona i zakona potencije (a) usporedba na temelju proračuna korištenjem aritmetičkih usrednjenih vrijednosti parametara, (b) usporedba na temelju proračuna korištenjem medijana parametara. Legenda: plava zvjezdica – aritmetička sredina / medijan mjerenih vrijednosti tijekom 62 h mjerenja, crvena krivulja – zakon potencija, crna krivulja – logaritamski zakon, zelena krivulja – prilagodba korištenjem izraza (55) i (56)

S ciljem istraživanja ovisnosti parametara  $\alpha$ ,  $u_*$  i  $z_0$  o usrednjenoj vrijednosti brzine vjetra  $\bar{u}$ , na Slikama 22 do 25 dan je prikaz dobivenih vremenskih nizova navedenih parametara za sva četiri ispitivana perioda usrednjavanja. Vizualnom usporedbom rezultata se može primijetiti da nema bitne razlike u značajkama ispitivanih parametara za različite periode usrednjavanja.

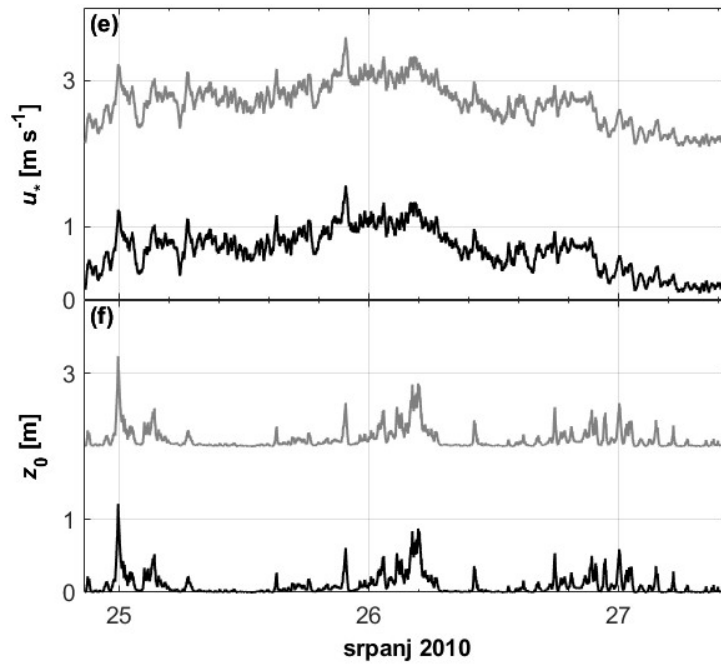
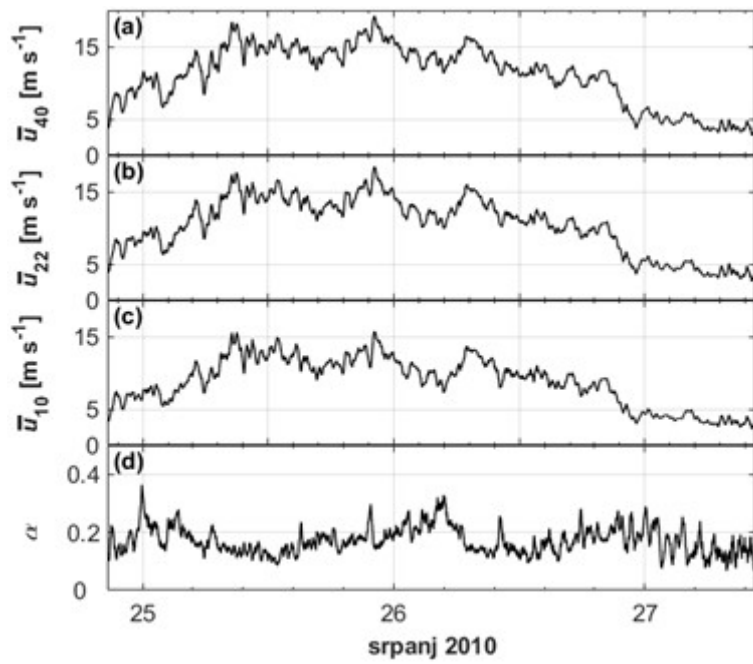


Slika 22: Klizne usrednjene vrijednosti brzine vjetra s periodom usrednjavanja 5 min na visini (a) 40 m, (b) 22 m i (c) 10 m; (d) eksponent zakona potencije  $\alpha$ , (e) brzina trenja  $u_*$  izračunata na dva različita načina: crna krivulja je dobivena korištenjem izraza (55), a siva krivulja izračunata je na temelju prilagodbe mjerenih podataka logaritamskom zakonu. Zbog jasnijeg prikaza siva krivulja je pomaknuta prema gore za 2 m s<sup>-1</sup>; (f) aerodinamička duljina hrapavosti površine,  $z_0$ , \* izračunata na dva različita načina: crna krivulja je dobivena korištenjem izraza (56), a siva krivulja izračunata je na temelju prilagodbe mjerenih podataka logaritamskom zakonu. Zbog jasnijeg prikaza siva krivulja je pomaknuta prema gore za 2 m.

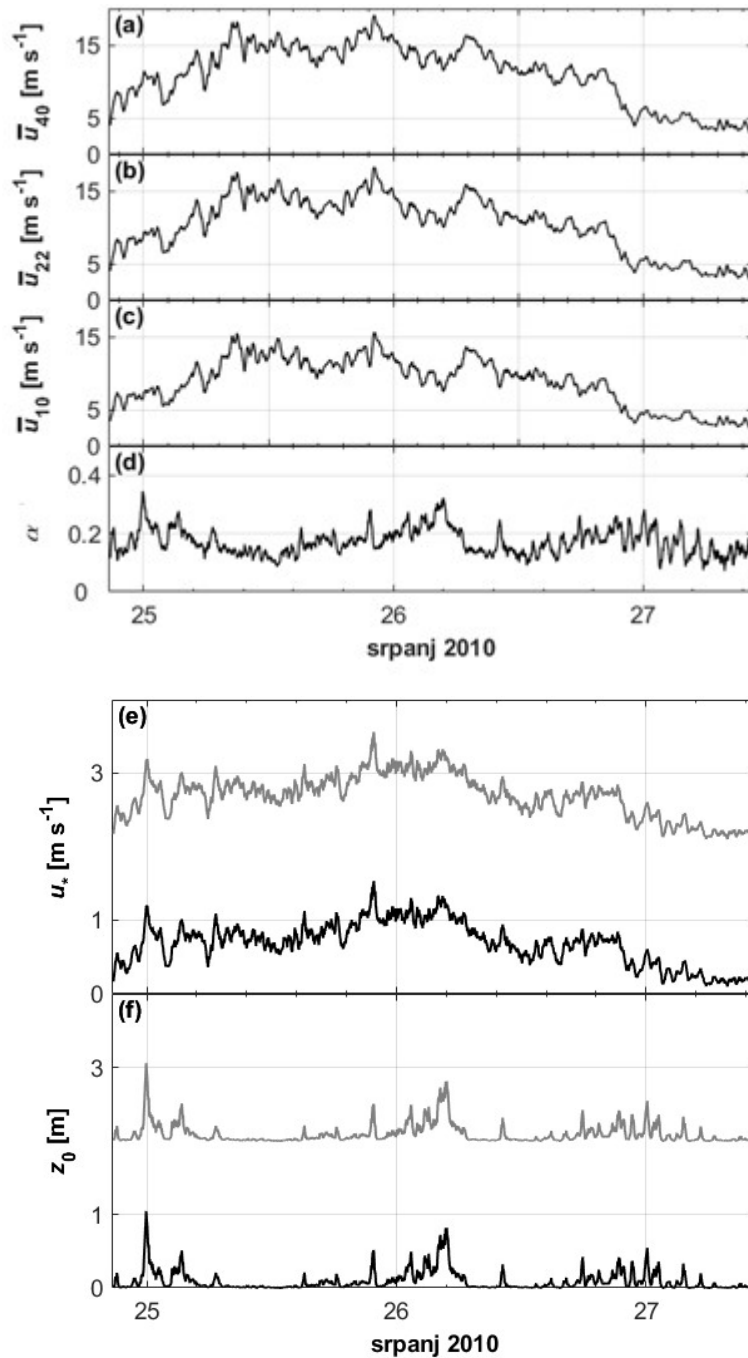


Slika 23: Isto kao Slika 22 samo za period usrednjavanja od 8 min.





Slika 24: Isto kao Slika 22 samo za period usrednjavanja od 17 min.

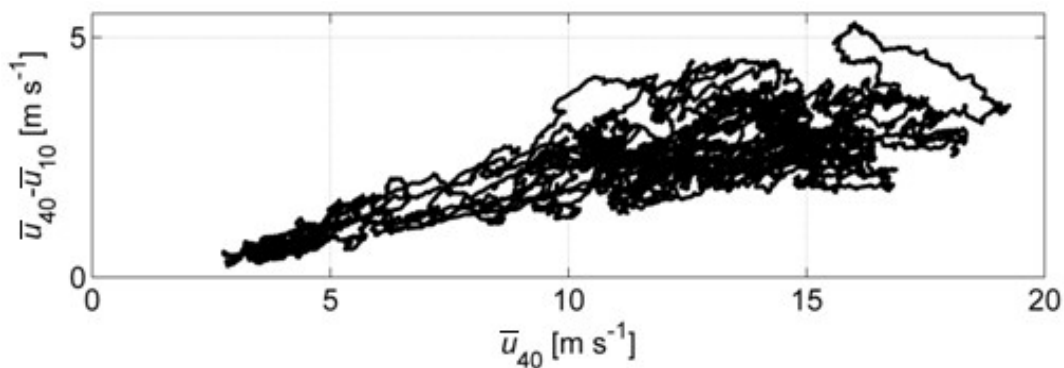


Slika 25: Isto kao Slika 22 samo za period usrednjavanja od 20 min.

Vremenski nizovi istraživanih parametara potvrđuju zaključke postignute na temelju statističke analize prikazane u Tablicama 10 – 14. Vrijednosti brzine trenja,  $u_*$ , dobivene primjenom izraza (55) i prilagodbom izmjerenih podataka logaritamskom zakonu su približno jednake za sve promatrane periode usrednjavanja, dok se vrijednosti aerodinamičke duljine hrapavosti tla,  $z_0$ , dobivene prilagodbom logaritamskog zakona na izmjerene podatke u određenoj mjeri razlikuju od vrijednosti dobivenih korištenjem izraza (56). Zamjetan je pad vrijednosti  $\alpha$  i  $z_0$ , kao i porast  $u_*$  pri smanjenju brzine bure. To upućuje na vertikalni profil

usrednjene brzine koji odgovara urbanom terenu pri manjim brzinama vjetra i ruralnom terenu pri većim brzinama vjetra tijekom udara bure. Kada vremenski usrednjena brzina postigne lokalni minimum,  $\alpha$  i  $z_0$  istovremeno postižu lokalni maksimum, dok pripadajuće vrijednosti  $u_*$  postižu lokalni minimum, i obrnuto. Slično ponašanje uočljivo je tijekom dana i noći.

Da bi se detaljnije ispitali trendovi zabilježeni na Slikama 22 - 25, na Slici 26 prikazan je odnos razlike vremenski usrednjenih vrijednosti brzina vjetra u  $x$ -smjeru izmjerenih na 40 m i 10 m, i apsolutne usrednjene vrijednosti brzine u  $x$ -smjeru na 40 m. Očito je da razlika između vremenski usrednjenih vrijednosti brzina na 40 m i 10 m raste sporije u odnosu na apsolutni iznos vremenski usrednjene brzine u  $x$ -smjeru na visini 40 m. Direktna primjena opažanja sa Slike 26 na izraze (2), (55) i (56) potvrđuje gore navedene zaključke o ponašanju promatranih parametara, Slike 22 – 25.



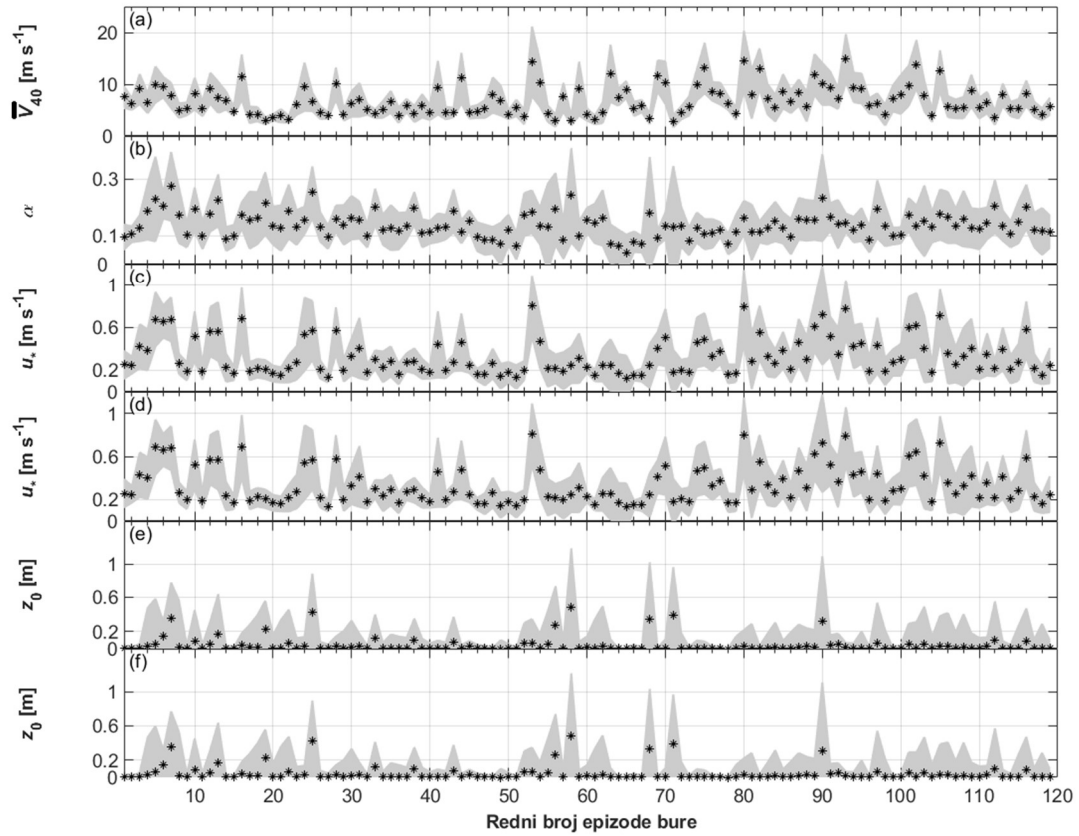
Slika 26: Razlika vremenski usrednjenih vrijednosti brzina vjetra u  $x$ -smjeru izmjerenih na visinama od 40 m i 10 m u odnosu na apsolutne vremenski usrednjene vrijednosti brzine u  $x$ -smjeru na visini od 40 m.

Ova ista analiza provedena je i za preostalih 118 epizoda bure. Budući da je na primjeru ljetne analize bure potvrđeno da je period od 17 min prikladan period usrednjavanja za buru te da obuhvaća sve skale od interesa za ovaj rad, klizne usrednjene vrijednosti izmjerenih vrijednosti brzine vjetra dobivene su usrednjavanjem uz period usrednjavanja od 17 min. Vrijedno je spomenuti da je period usrednjavanja od 17 min vrlo sličan periodu usrednjavanja od 15 min koji su predložili Babić i sur. (2016).

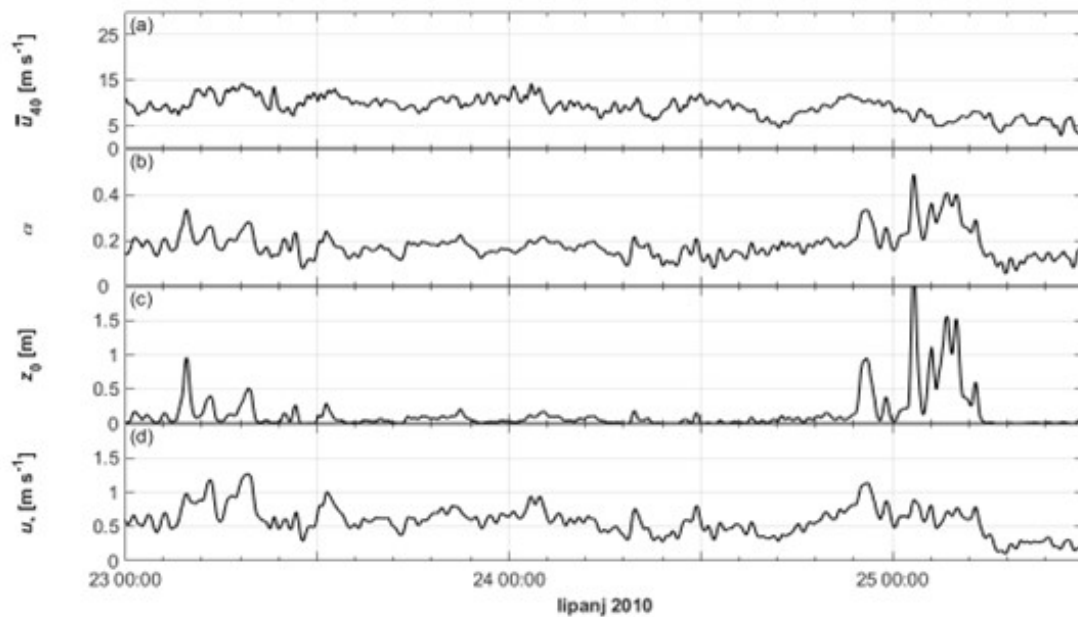
Za svaku epizodu bure proračunati su  $\alpha$ ,  $u_*$  i  $z_0$  na način opisan u poglavlju 3.2. Tako dobivene vrijednosti su usrednjene pa je svaka epizoda bure karakterizirana jednom usrednjenom vrijednosti parametra  $\alpha$  i  $u_*$  te medijanom parametra  $z_0$ . Iz Slike 27(b) očito je da

usrednjene vrijednosti  $\alpha$  poprimaju vrijednosti u rasponu od 0,05 do 0,30. Veće usrednjene vrijednosti  $\alpha$  odgovaraju većim usrednjenim vrijednostima brzine na visini od 40 m. Vertikalni profil brzine ukazuje na profil brzine tipičan za urbana područja za vrijeme manjih brzina vjetra, i profil tipičan za ruralna područja za vrijeme većih brzina vjetra. U skladu s rezultatima dobivenim za jednu ljetnu epizodu bure,  $u_*$  i  $z_0$  su približno jednaki kada su proračunati prilagodbom podataka na logaritamski zakon i direktnom primjenom na sloj između 10 m i 40 m korištenjem izraza (55) i (56), Slike 27(c)-27(f). Usrednjene vrijednosti brzine trenja u rasponu su između  $0,1 \text{ m s}^{-1}$  i  $0,8 \text{ m s}^{-1}$ , Slike 27(c) i 27(d). Na Slikama 27(e) i 27(f) prikazan je medijan  $z_0$  jer je to prikladniji parametar za opis vrijednosti aerodinamičke duljine hrapavosti koje slijede raspodjelu sličnu Poissonovoj. Vrijednosti medijana  $z_0$  za većinu promatranih epizoda bure poprimaju vrijednosti između 0,0 m i 0,2 m. Kod epizoda s većim vrijednostima  $z_0$  zamijećene su izraženije vrijednosti standardne devijacije.

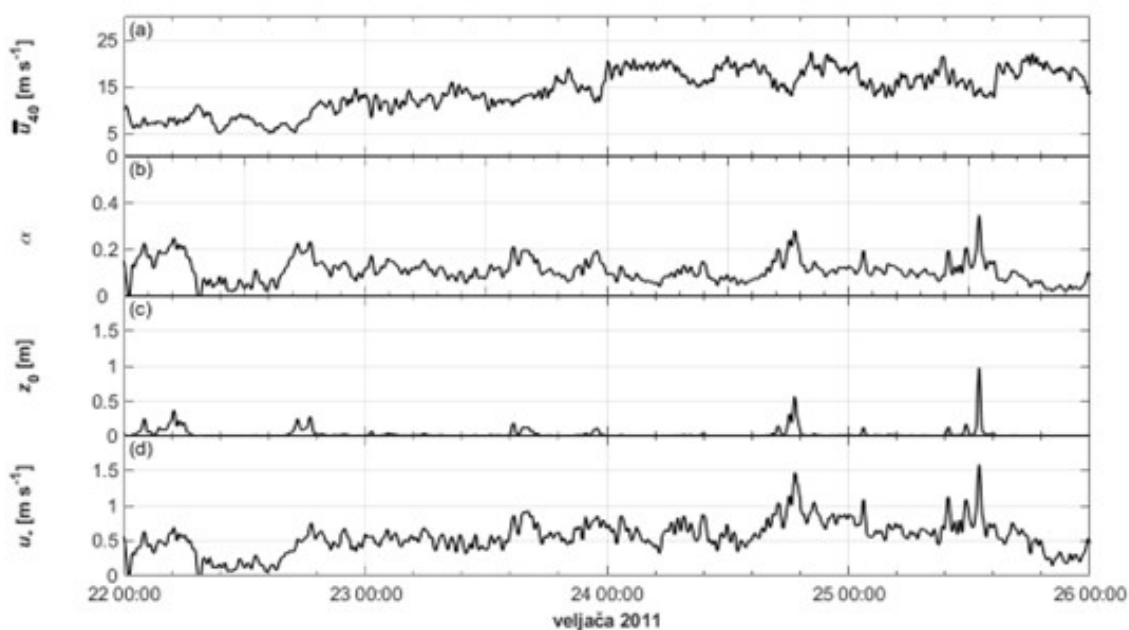
Također su istraženi vremenski nizovi  $\alpha$ ,  $u_*$  i  $z_0$  i njihova varijacija kroz različita godišnja doba. Za istraživanje utjecaja godišnjih doba na ponašanje navedenih parametara izabrana je jedna reprezentativna epizoda bure iz ljetnog razdoblja, epizoda #12, i jedna reprezentativna epizoda bure iz zimskog razdoblja, epizoda #75. Iako se općenito smatra da je eksponent zakona potencije konstantan za određeni tip terena, u ovoj analizi je pokazano da suprotno jer  $\alpha$  poprima značajno različite vrijednosti koje upućuju na profil vjetra tipičan za ruralna područja kod većih iznosa brzina vjetra i profil tipičan za urbana područja kod manjih brzina vjetra, Slike 28 i 29 (Lepri i sur., 2017). Za prikazane epizode bure može se primijetiti da i  $u_*$  i  $z_0$  značajno variraju u vremenu. Vrijednosti  $u_*$  i  $z_0$  dobivene korištenjem izraza (55) i (56) nisu prikazane jer su približno jednake vrijednostima dobivenima direktnom prilagodbom na logaritamski zakon. Zimska bura je puno jača od ljetne epizode. Parametri  $\alpha$ ,  $u_*$  i  $z_0$  imaju veće amplitude i izraženije variraju tijekom ljetne epizode bure u odnosu na zimsku epizodu. Iz Slike 30 može se zaključiti da i zakon potencije i logaritamski zakon prilično dobro opisuju vertikalne profile brzine vjetra neovisno o godišnjem dobu.



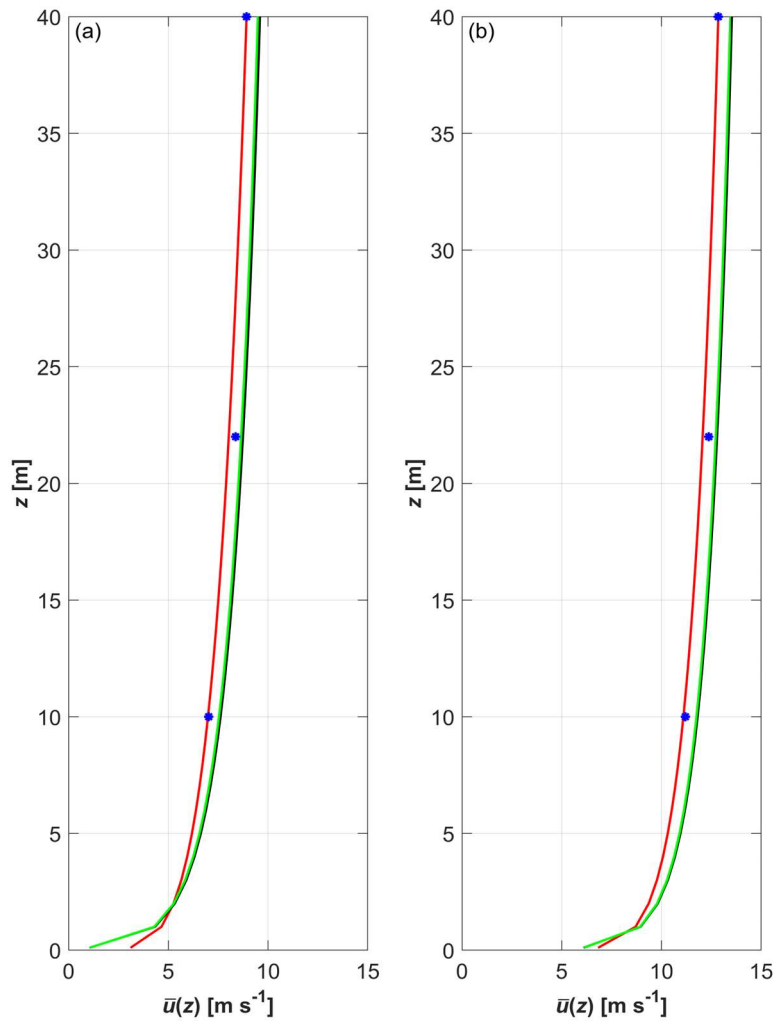
Slika 27: Usrednjene vrijednosti (a) brzine vjetra na visini 40 m; (b) eksponenta zakona potencije,  $\alpha$ ; brzine trenja (c) preko izraza (55); (d) prilagodbom na logaritamski zakon; medijan aerodinamičke duljine hrapavosti,  $z_0$  (e) preko izraza (56); (f) prilagodbom na logaritamski zakon. Legenda: crna zvjezdica je usrednjena vrijednost / medijan pojedinog parametra za svaku epizodu bure kroz cijeli vremenski zapis za svaku pojedinu epizodu bure; sivo zasjenjeno područje predstavlja raspon standardne devijacije za svaku epizodu bure.



Slika 28: Vremenski niz (a) klizno usrednjenih vrijednosti brzine vjetra s periodom usrednjavanja 17 min na visini 40 m; (b) eksponenta zakona potencije,  $\alpha$ ; (c) brzine trenja,  $u_*$ ; (d) aerodinamičke duljine hrapavosti površine,  $z_0$  za ljetnu epizodu bure #12.  $u_*$  i  $z_0$  izračunati su prilagodbom na logaritamski zakon.



Slika 29: Vremenski niz (a) klizno usrednjenih vrijednosti brzine vjetra s periodom usrednjavanja 17 min na visini 40 m; (b) eksponenta zakona potencije,  $\alpha$ ; (c) brzine trenja,  $u_*$ ; (d) aerodinamičke duljine hrapavosti površine,  $z_0$  za zimsku epizodu bure #75.  $u_*$  i  $z_0$  izračunati su prilagodbom na logaritamski zakon.



Slika 30: Vertikalni profil brzine vjetra u usporedbi sa zakonom potencije i logaritamskim zakonom; korištene aritmetičke sredine. Legenda: plava zvjezdica – aritmetička sredina izmjerene vrijednosti brzine vjetra kroz cijeli vremenski zapis promatrane epizode bure; crvena puna krivulja – zakon potencije; crna puna krivulja – logaritamski zakon; zelena puna krivulja – logaritamski zakon korištenjem izraza (55) i (56). (a) ljetna epizoda bure #12, (b) zimska epizoda bure #75.

### 4.3 Intenzitet turbulencije

Preliminarne analize intenziteta turbulencije tijekom bure provedene su na temelju ljetne epizode bure #16. U Tablicama 14 do 17 dan je pregled statističkih podataka za intenzitet turbulencije u x- y- i z-smjeru za sva četiri perioda usrednjavanja na visinama 10 m, 22 m i 40 m.

Tablica 14: Statistički podaci za intenzitet turbulencije izračunat korištenjem izraza (4) na visini 10 m, 22 m i 40 m za period usrednjavanja od 5 min za ljetnu buru #16

Statistički parametar	Visina								
	10 m			22 m			40 m		
	$I_u$	$I_v$	$I_w$	$I_u$	$I_v$	$I_w$	$I_u$	$I_v$	$I_w$
<b>Medijan</b>	0,21	0,16	0,09	0,15	0,14	0,08	0,13	0,12	0,07
<b>Aritmetička sredina</b>	0,21	0,18	0,10	0,16	0,15	0,08	0,14	0,14	0,08
<b>Minimalna vrijednost</b>	0,10	0,09	0,06	0,05	0,06	0,03	0,04	0,03	0,02
<b>Maksimalna vrijednost</b>	1,75	1,48	0,53	1,70	1,53	0,58	2,00	1,55	0,59
<b>Standardna devijacija</b>	0,06	0,06	0,03	0,06	0,06	0,03	0,06	0,06	0,04

Tablica 15: Statistički podaci za intenzitet turbulencije izračunat korištenjem izraza (4) na visini 10 m, 22 m i 40 m za period usrednjavanja od 8 min za ljetnu buru #16

Statistički parametar	Visina								
	10 m			22 m			40 m		
	$I_u$	$I_v$	$I_w$	$I_u$	$I_v$	$I_w$	$I_u$	$I_v$	$I_w$
<b>Medijan</b>	0,21	0,17	0,09	0,15	0,14	0,08	0,13	0,13	0,07
<b>Aritmetička sredina</b>	0,22	0,18	0,10	0,16	0,16	0,09	0,15	0,14	0,08
<b>Minimalna vrijednost</b>	0,12	0,10	0,06	0,07	0,08	0,03	0,05	0,04	0,03
<b>Maksimalna vrijednost</b>	1,02	0,81	0,28	0,98	0,77	0,27	1,06	0,71	0,29
<b>Standardna devijacija</b>	0,06	0,06	0,02	0,06	0,06	0,03	0,06	0,06	0,03

Tablica 16: Statistički podaci za intenzitet turbulencije izračunat korištenjem izraza (4) na visini 10 m, 22 m i 40 m za period usrednjavanja od 17 min za ljetnu buru #16

Statistički parametar	Visina								
	10 m			22 m			40 m		
	$I_u$	$I_v$	$I_w$	$I_u$	$I_v$	$I_w$	$I_u$	$I_v$	$I_w$
<b>Medijan</b>	0,22	0,17	0,09	0,16	0,15	0,08	0,14	0,14	0,07
<b>Aritmetička sredina</b>	0,23	0,19	0,10	0,17	0,17	0,09	0,15	0,15	0,08
<b>Minimalna vrijednost</b>	0,14	0,12	0,06	0,09	0,09	0,04	0,06	0,06	0,03
<b>Maksimalna vrijednost</b>	0,76	0,70	0,22	0,70	0,66	0,21	0,69	0,64	0,23
<b>Standardna devijacija</b>	0,05	0,07	0,02	0,05	0,06	0,03	0,05	0,06	0,03

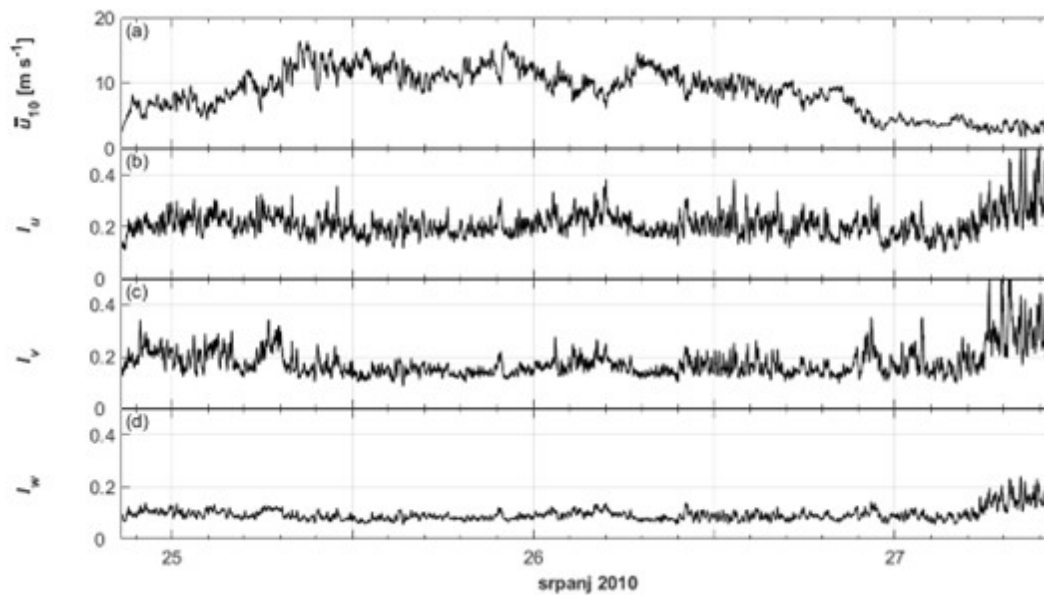


Tablica 17: Statistički podaci za intenzitet turbulencije izračunat korištenjem izraza (4) na visini 10 m, 22 m i 40 m za period usrednjavanja od 20 min za ljetnu buru #16

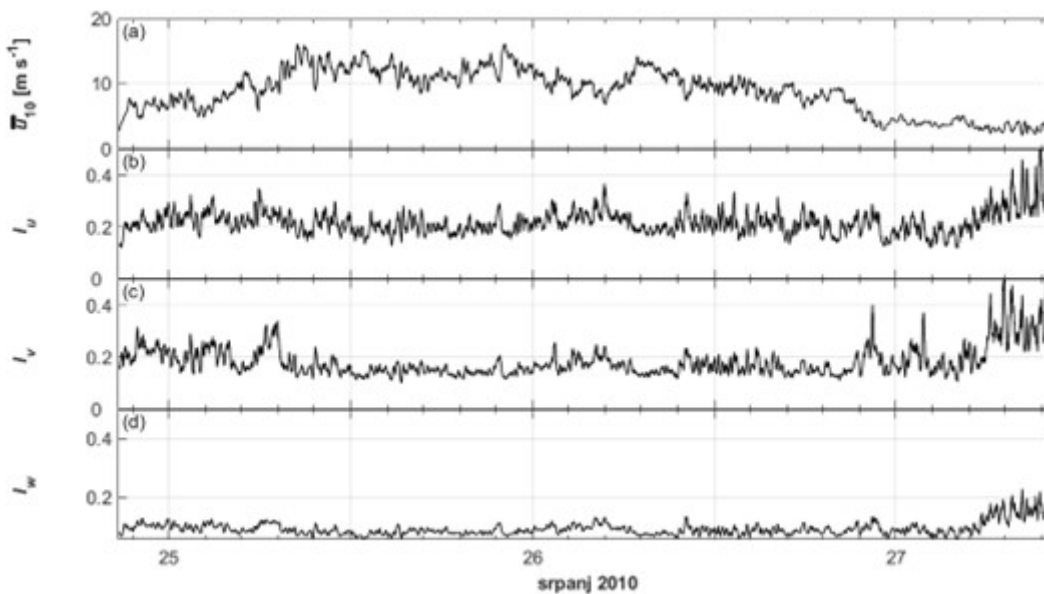
Statistički parametar	Visina								
	10 m			22 m			40 m		
	$I_u$	$I_v$	$I_w$	$I_u$	$I_v$	$I_w$	$I_u$	$I_v$	$I_w$
<b>Medijan</b>	0,22	0,17	0,09	0,16	0,15	0,08	0,14	0,14	0,07
<b>Aritmetička sredina</b>	0,23	0,19	0,10	0,17	0,17	0,09	0,16	0,15	0,08
<b>Minimalna vrijednost</b>	0,14	0,12	0,06	0,09	0,09	0,04	0,06	0,06	0,03
<b>Maksimalna vrijednost</b>	0,67	0,65	0,20	0,62	0,63	0,20	0,61	0,60	0,23
<b>Standardna devijacija</b>	0,05	0,07	0,02	0,05	0,06	0,03	0,05	0,06	0,03

Za različite periode usrednjavanja medijan intenziteta turbulencije u  $x$ -smjeru iznosi između 0,21 i 0,22 na visini 10 m, između 0,15 i 0,16 na visini 22 m, i između 0,13 i 0,14 na visini 40 m. Medijan intenziteta turbulencije u  $y$ -smjeru iznosi između 0,16 i 0,17 na visini 10 m, između 0,14 i 0,15 na visini 22 m, i između 0,12 i 0,14 m na visini 40 m, dok intenzitet turbulencije u  $z$ -smjeru varira između 0,09 na visini 10 m, 0,08 na visini 22 m, i 0,07 na visini od 40 m. Vrijednosti medijana dobro se podudaraju s odgovarajućim vrijednostima aritmetičke sredine, a iz Tablica 14 - 17 može se primijetiti da kod oba parametra za sve tri komponente intenziteta turbulencije zabilježene vrijednosti rastu s porastom duljine perioda usrednjavanja. Standardna devijacija s vrijednostima između 0,02 i 0,07 za sve komponente intenziteta turbulencije i za sva četiri promatrana perioda usrednjavanja ukazuje da podaci značajno odudaraju od odgovarajuće usrednjene vrijednosti. U prethodnim istraživanjima bure se pokazalo da su značajne varijacije statističkih momenata višeg reda povezane s mahovitosti bure (npr., Grisogono i Belušić, 2009; Kozmar i sur., 2012a; Večenaj i sur., 2012).

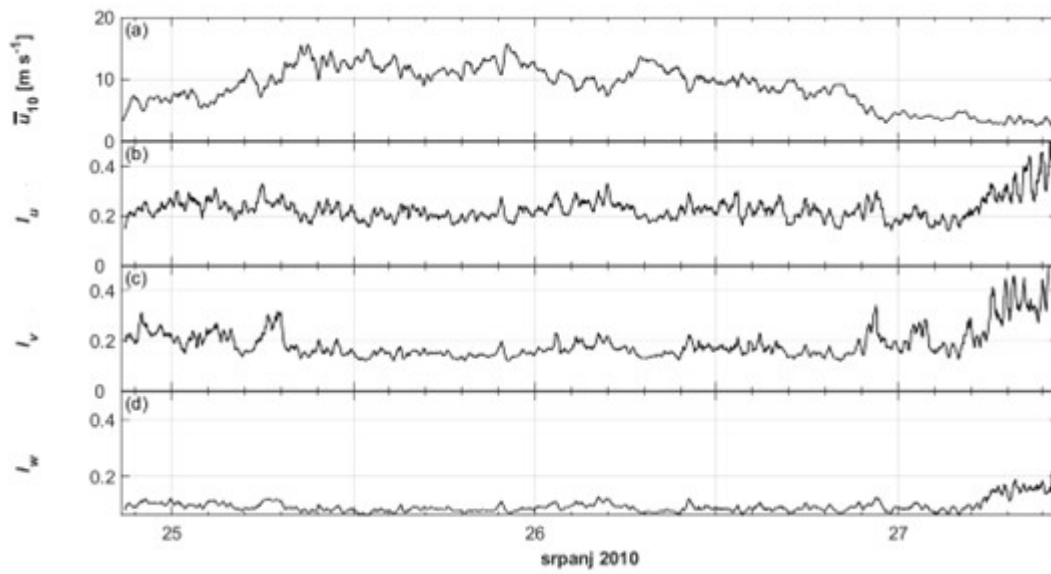
Kako bi se istražila ovisnost  $I_u$ ,  $I_v$  i  $I_w$  o usrednjenjnoj vrijednosti brzine vjetra, dani su prikazi vremenskih nizova komponenti intenziteta turbulencije za različite periode usrednjavanja na sve tri promatrane visine, Slike 31 - 42. Iz prikazanih rezultata se može zaključiti da su vremenski nizovi za sva četiri perioda usrednjavanja slični.



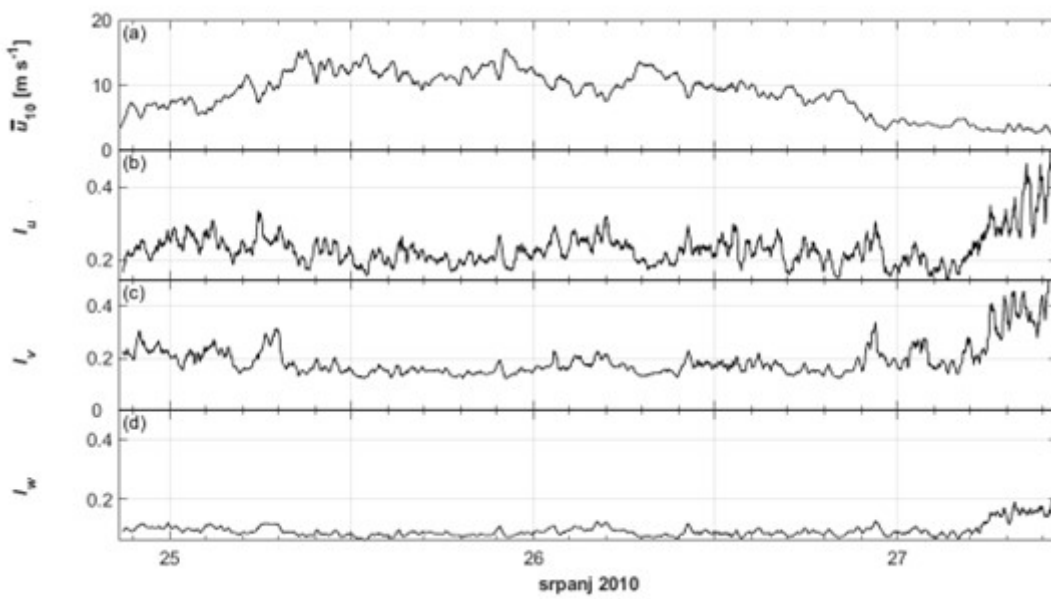
Slika 31: (a) Klizne usrednjene vrijednosti brzine vjetra u  $x$ -smjeru s periodom usrednjavanja 5 min na visini 10 m; vremenski niz (b) intenziteta turbulencije u  $x$ -smjeru (c) intenziteta turbulencije u  $y$ -smjeru (d) intenziteta turbulencije u  $z$ -smjeru.



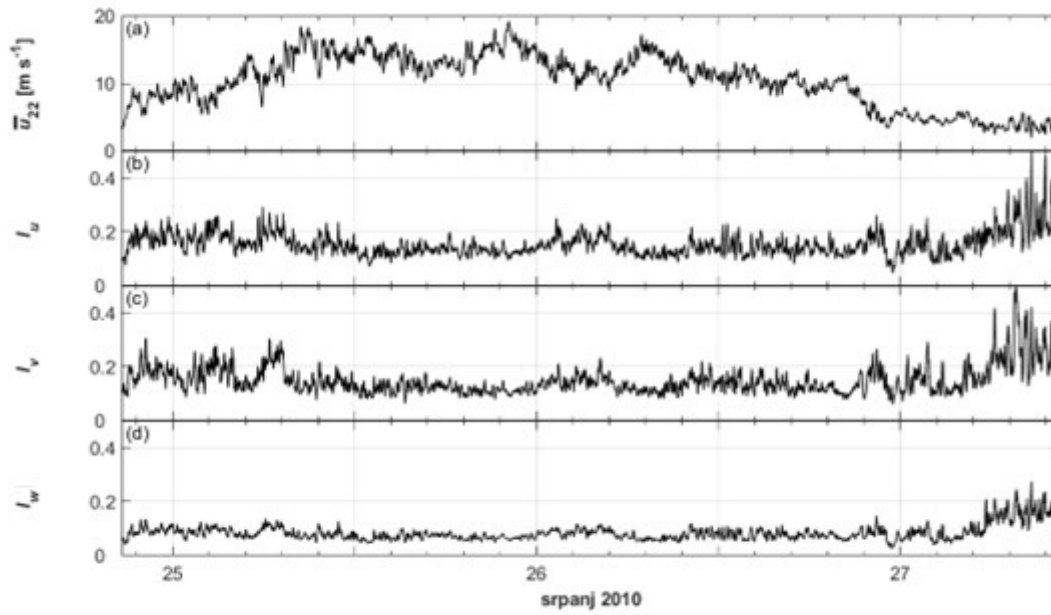
Slika 32: Isto kao Slika 31, ali za period usrednjavanja 8 min.



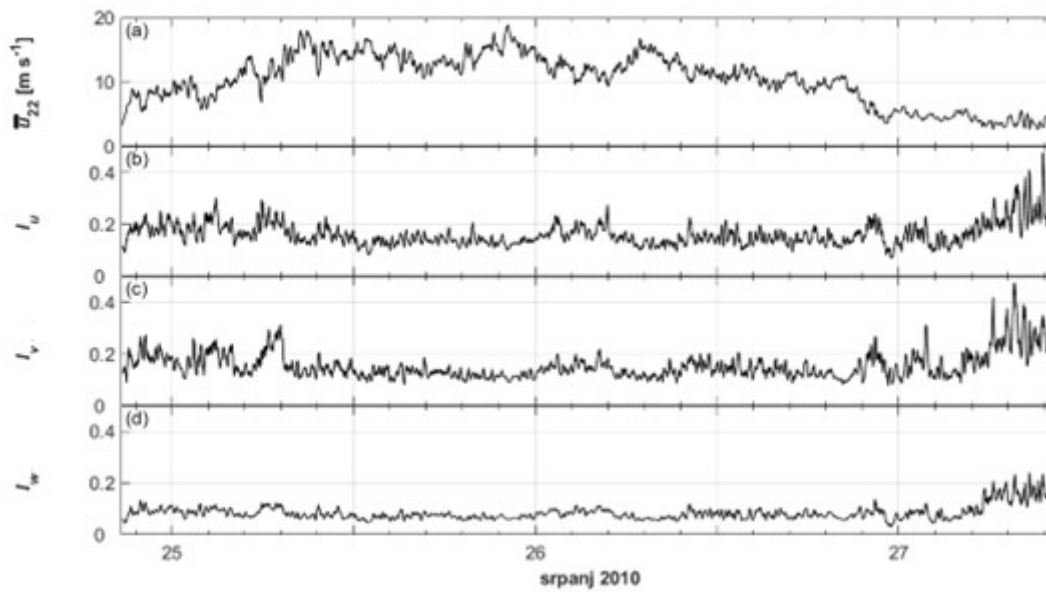
Slika 33: Isto kao Slika 31, ali za period usrednjavanja 17 min.



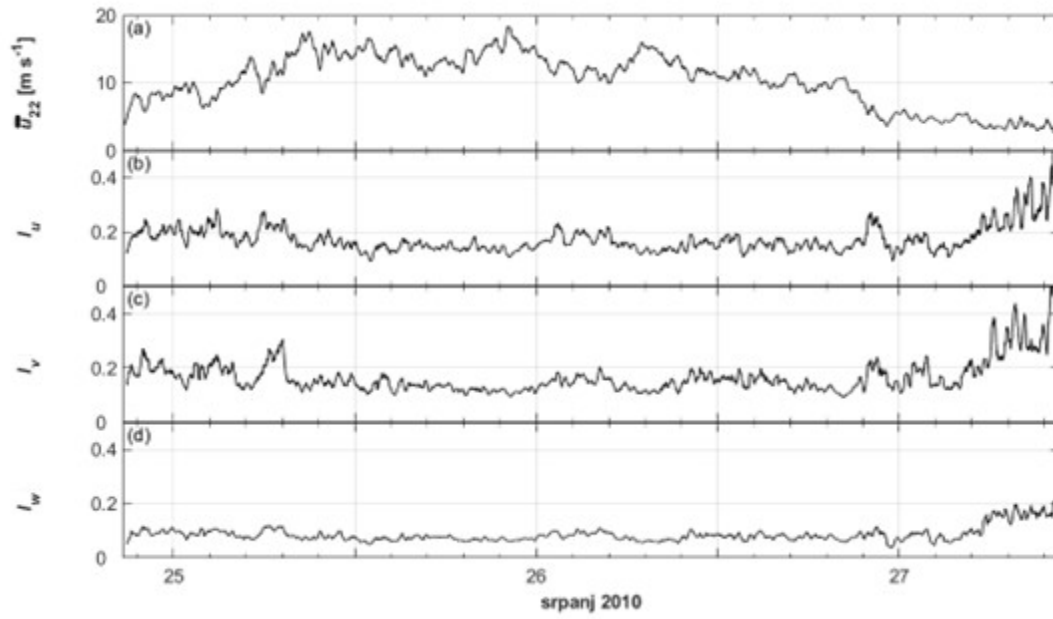
Slika 34: Isto kao Slika 31, ali za period usrednjavanja 20 min.



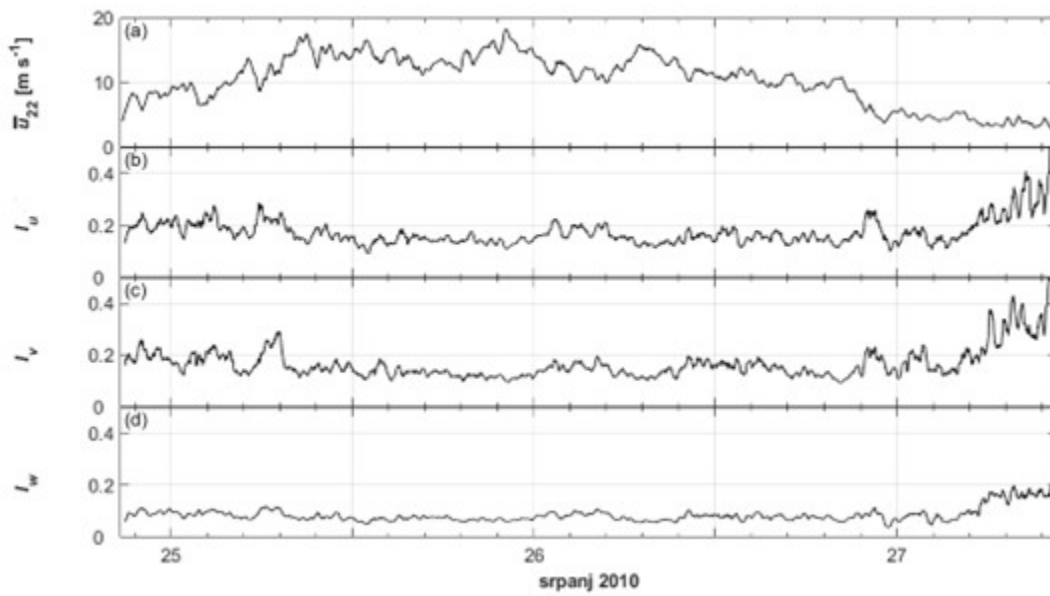
Slika 35: (a) Klizne usrednjene vrijednosti brzine vjeta u  $x$ -smjeru s periodom usrednjavanja 5 min na visini 22 m; vremenski niz (b) intenziteta turbulencije u  $x$ -smjeru (c) intenziteta turbulencije u  $y$ -smjeru (d) intenziteta turbulencije u  $z$ -smjeru.



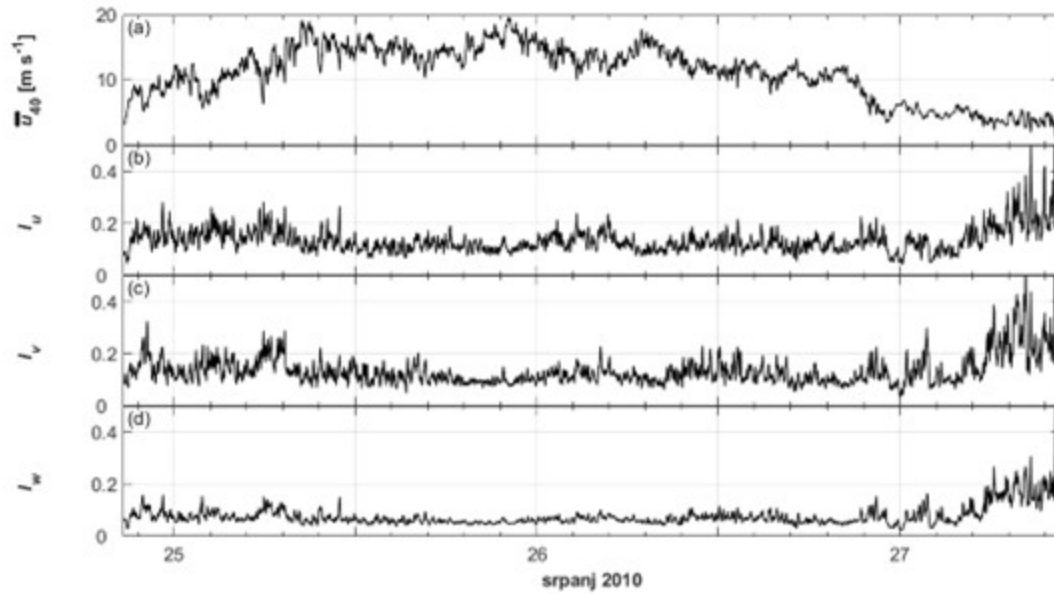
Slika 36: Isto kao Slika 35, ali za period usrednjavanja 8 min.



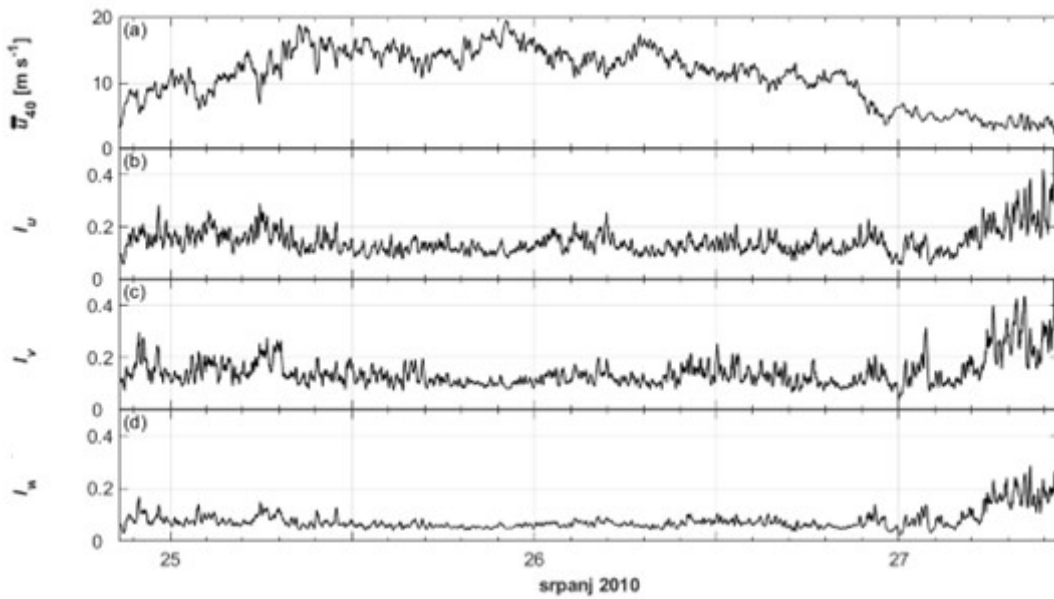
Slika 37: Isto kao Slika 35, ali za period usrednjavanja 17 min.



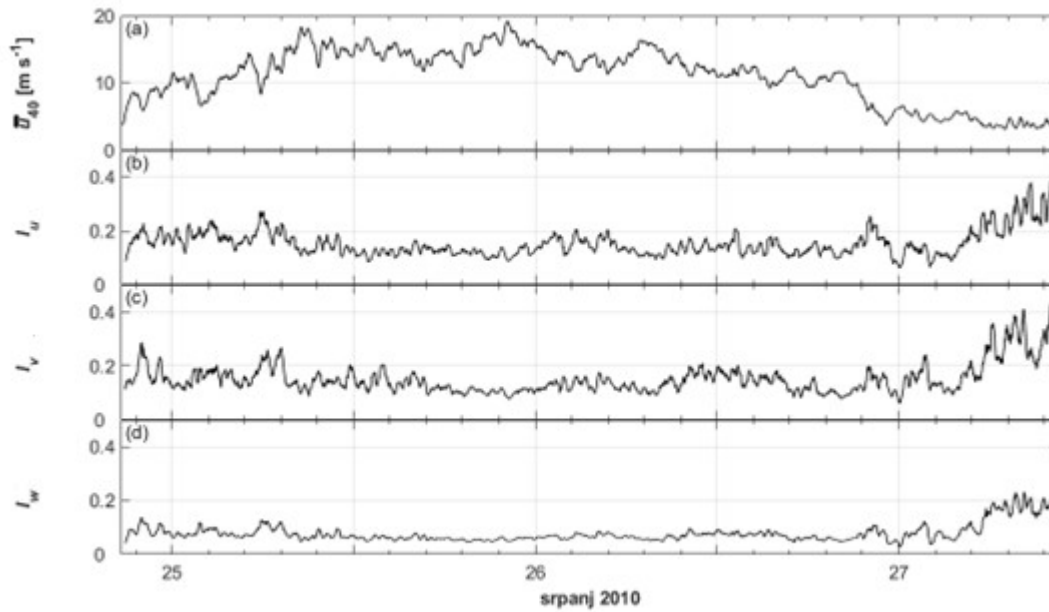
Slika 38: Isto kao Slika 35, ali za period usrednjavanja 20 min.



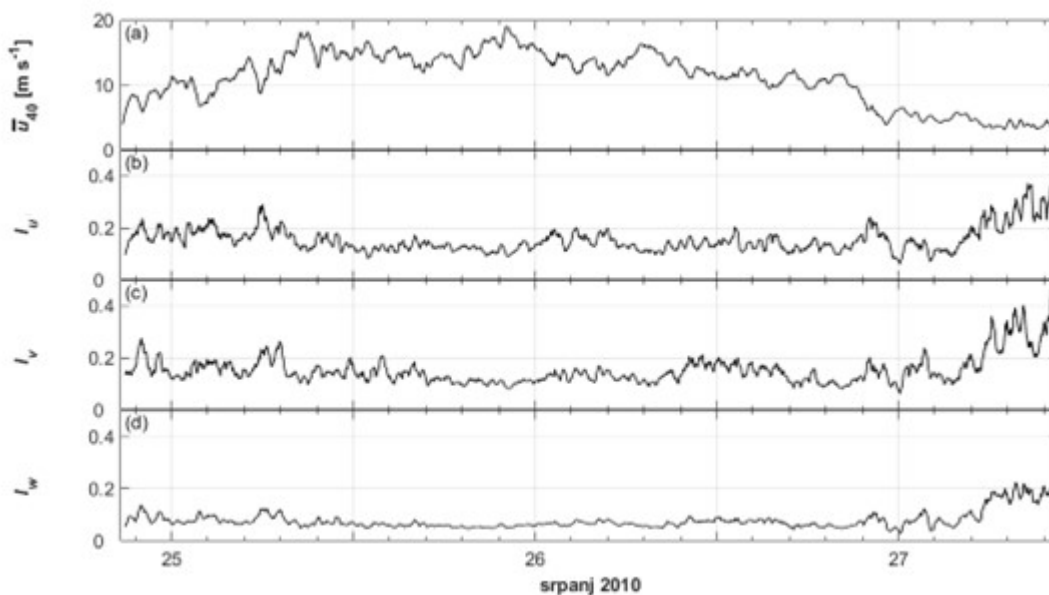
Slika 39: (a) Klizne usrednjene vrijednosti brzine vjeta u  $x$ -smjeru s periodom usrednjavanja 5 min na visini 40 m; vremenski niz (b) intenziteta turbulencije u  $x$ -smjeru (c) intenziteta turbulencije u  $y$ -smjeru (d) intenziteta turbulencije u  $z$ -smjeru.



Slika 40: Isto kao Slika 39, ali za period usrednjavanja 8 min.



Slika 41: Isto kao Slika 39, ali za period usrednjavanja 17 min.



Slika 42: Isto kao Slika 39, ali za period usrednjavanja 20 min.

Slike 31 – 42 potvrđuju rezultate analize korištenjem statističkih metoda u Tablicama 14 - 17. Vertikalna komponenta intenziteta turbulencije je u prosjeku dva puta manja od horizontalnih komponenti, i to za sve vrijednosti perioda usrednjavanja na sve tri visine. Kod usrednjenih vrijednosti brzine većih od približno  $5 \text{ m s}^{-1}$  su vrijednosti komponenti intenziteta turbulencije približno konstantne, tj. nisu u korelaciji s varijacijama usrednjene brzine vjetra (Lepri i sur., 2015). Tijekom perioda kada su usrednjene vrijednosti brzine vjetra veće od  $5 \text{ m s}^{-1}$ , usrednjena vrijednost varijacija brzine vjetra iznosi oko 30 % u odnosu na usrednjenu

vrijednost brzine vjetra usrednjenu kroz svih 62 h koliko je trajala analizirana epizoda bure. Istovremeno je odgovarajuća usrednjena vrijednost devijacije komponenti  $I_u$ ,  $I_v$  i  $I_w$  između 14 % i 24 % u odnosu na odgovarajuću usrednjenu vrijednost izračunatu kroz cijelo trajanje epizode bure. Nema jasnih trendova u značajkama komponenti intenziteta turbulencije povezanih s izmjenom noći i dana. Ova kritična brzina od  $5 \text{ m s}^{-1}$  može biti povezana ili s brzim i kratkim prolaskom bure ili potpuno drugačijim termički uzrokovanim katabatičkim strujanjem (npr., Grisogono i Belušić, 2009; Grisogono i sur., 2015).

Omjeri komponenti intenziteta turbulencije bure,  $I_u$ ,  $I_v$  i  $I_w$ , nisu u potpunosti sukladni izrazu,

$$I_u : I_v : I_w = 1 : 0,75 : 0,5, \quad (56)$$

koji je predložio Counihan (1975), niti s izrazom koji je predložio Holmes (2007),

$$I_u : I_v : I_w = 1 : 0,88 : 0,55, \quad (57)$$

a koji vrijede u AGS-u za inženjerske svrhe.

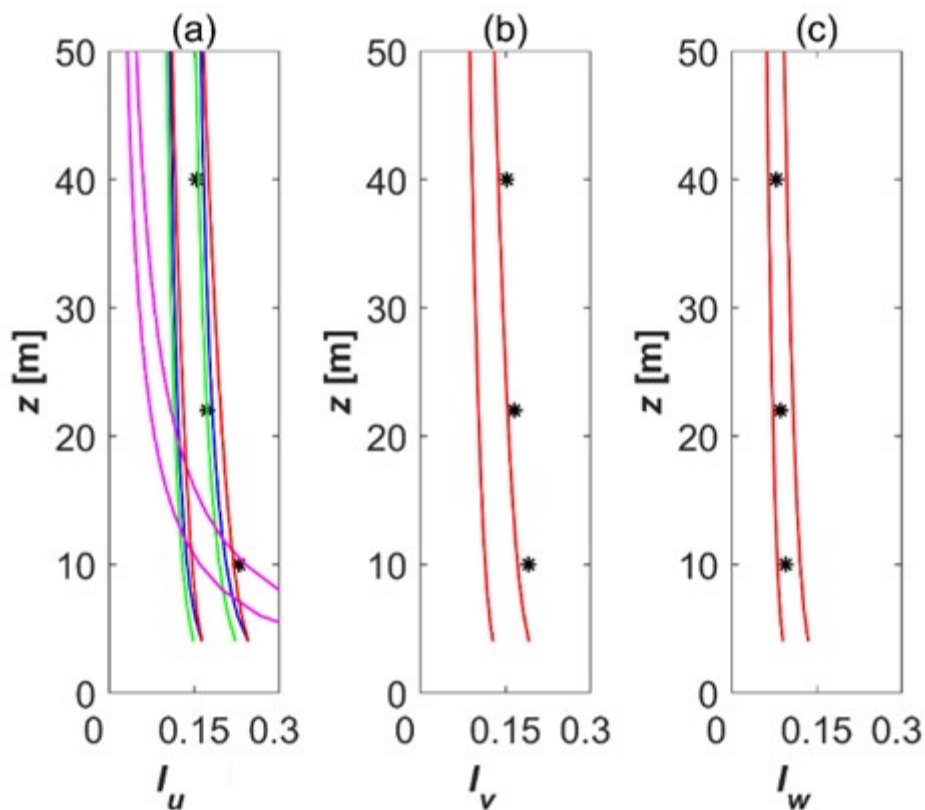
U Tablici 19 dan je omjer komponenti intenziteta turbulencije izračunatih za promatranu epizodu bure. Iako se može primijetiti da se omjer između  $I_w$  i  $I_u$  dobro podudara s izrazima (56) i (57), vrijednosti  $I_v$  i  $I_u$  su vrlo slične, posebno na većim visinama. To upućuje na činjenicu da su lateralne fluktuacije bure snažnije u odnosu na fluktuacije longitudinalne brzine tipične za uobičajeni AGS. Omjeri različitih komponenti intenziteta turbulencije za periode usrednjavanja od 5, 8 i 20 min nisu prikazani jer su vrlo sličnih vrijednosti kao za period usrednjavanja od 17 min.

Tablica 19: Omjeri različitih komponenti intenziteta turbulencije za period usrednjavanja od 17 min na tri visine za ljetnu buru #16

Visina	$I_v/I_u$	$I_w/I_u$
10 m	0,83	0,45
22 m	0,95	0,50
40 m	1,00	0,50



Da bi se dodatno istražili trendovi intenziteta turbulencije s porastom visine, vertikalni profili  $I_u$ ,  $I_v$  i  $I_w$  za period usrednjavanja od 17 min prikazani su na Slici 43. Vertikalni profili odgovarajućih komponenti intenziteta turbulencije za druge ispitivane periode usrednjavanja su u osnovi jednaki ovima, pa stoga nisu prikazani. Dobiveni podaci su usporedivi s odgovarajućim vrijednostima navedenima u međunarodnim normama ESDU 85020 (1985), ISO 4354 (1997), HRN EN 1991 Eurocode 1 (2005), ASCE 7-05 (2006) i AIJ (2006).

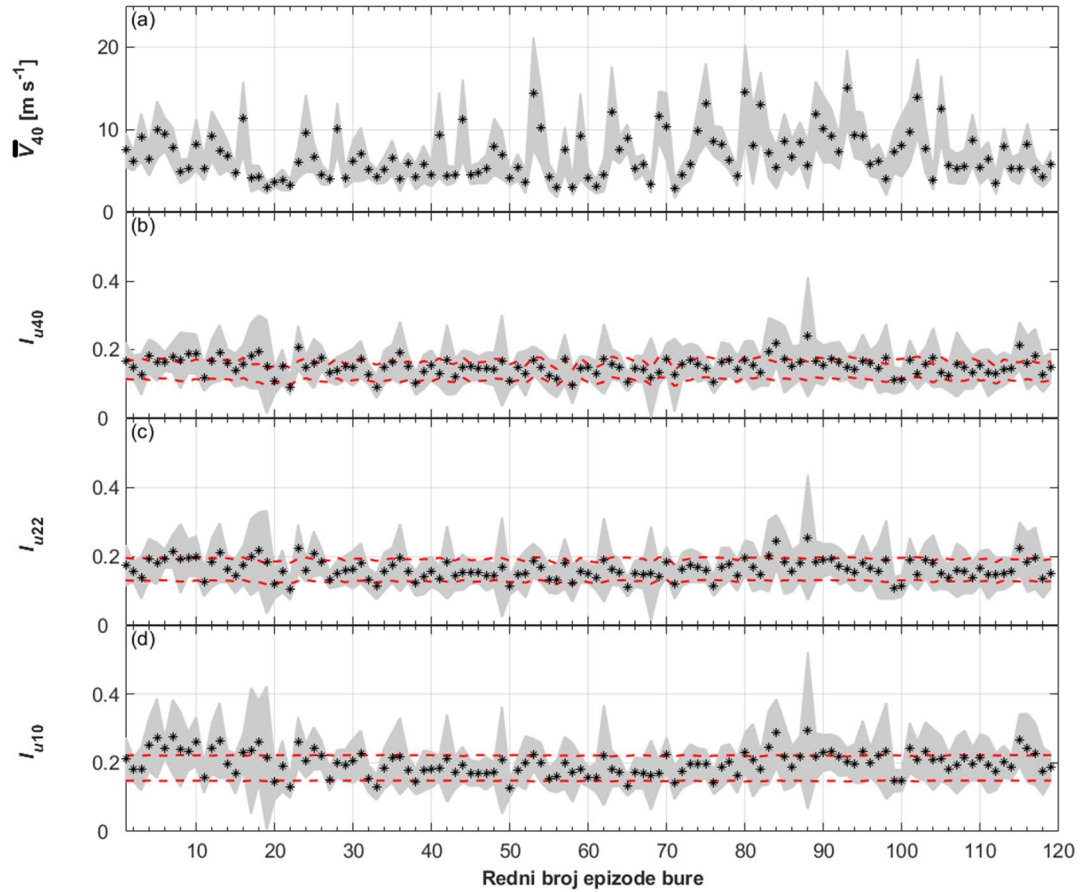


Slika 43: Vertikalni profili komponenti intenziteta turbulencije za period usrednjavanja 17 min u (a)  $x$ -, (b)  $y$ - i (c)  $z$ -smjeru usrednjeni kroz cijeli vremenski zapis i uspoređeni s vrijednostima danim u međunarodnim normama s rasponom tolerancije  $\pm 20\%$ . Legenda: zvjezdica - usrednjena vrijednost intenziteta turbulencije, crvena krivulja - ESDU 85020 (1985) za  $z_0 = 0,03$  m, plava krivulja - ISO 4354 (1997) i HRN EN 1991 Eurocode 1 (2005), ljubičasta krivulja - ASCE 7-05 (2006), zelena krivulja - AIJ (2006).

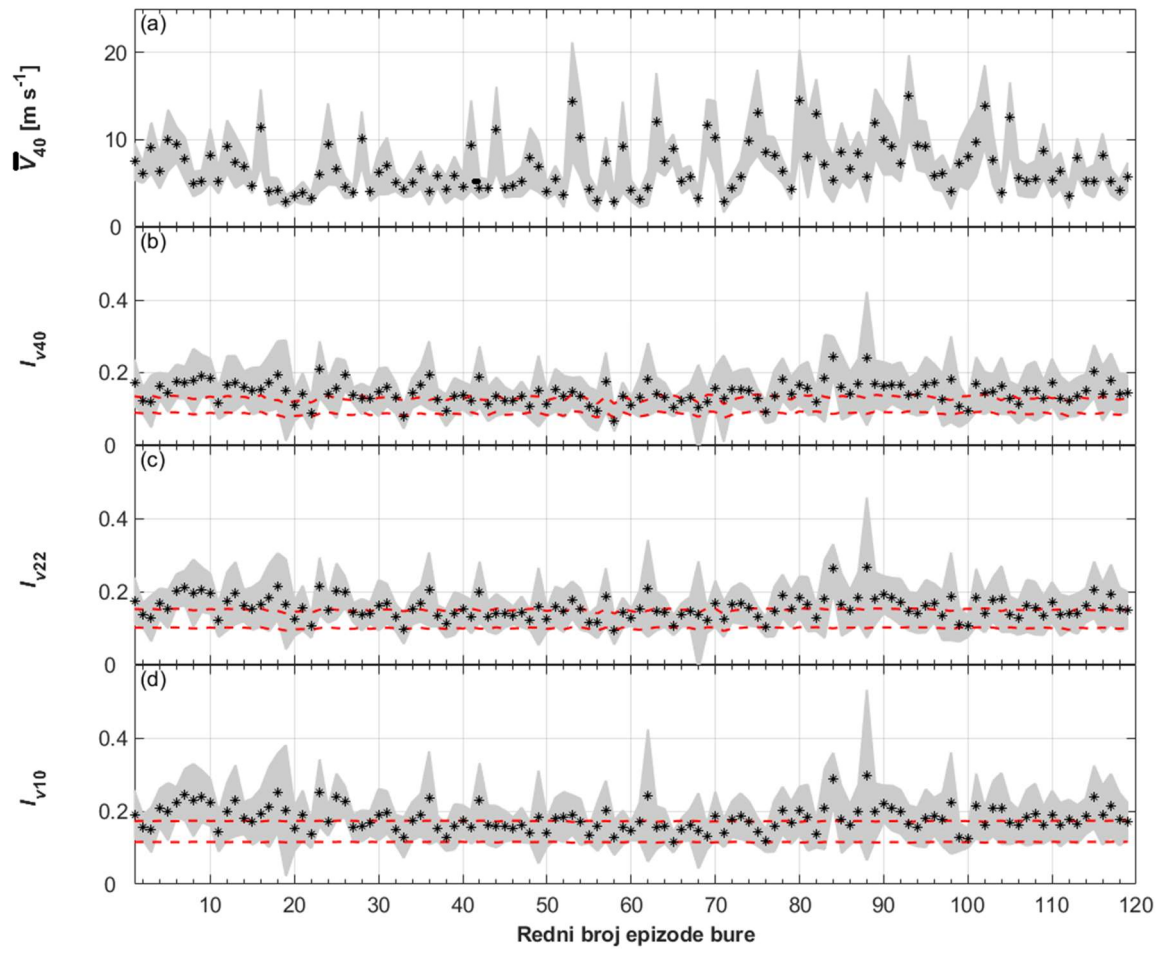
Vrijednosti prikazane kao zvjezdice na Slici 43 predstavljaju usrednjene vrijednosti izračunate za cijeli vremenski zapis promatrane epizode bure. Može se primijetiti da za ovu epizodu bure dobivene vrijednosti za sve tri komponente intenziteta turbulencije opadaju s porastom visine, što je u skladu s atmosferskom fizikom (npr., Stull, 1988). Vrijednosti  $I_u$  i  $I_w$  dobro se podudaraju s vrijednostima preporučenima u normi ESDU 85020 (1985) danim za  $z_0$

= 0,03 m, što odgovara zemljištu s ponekim drvetom i niskim raslinjem s izoliranim zgradama. Opis terena odgovara terenu na lokaciji Pometeno brdo. Postignute vrijednosti  $I_v$  su neznatno veće od predloženih vrijednosti. Izmjerene vrijednosti za komponentu intenziteta turbulencije u  $x$ -smjeru prilično se dobro podudaraju s vrijednostima preporučenima u ISO 4354 (1997), HRN EN 1991 Eurocode 1 (2005), AIJ (2006) i ASCE 7-05 (2006) (Lepri i sur., 2015).

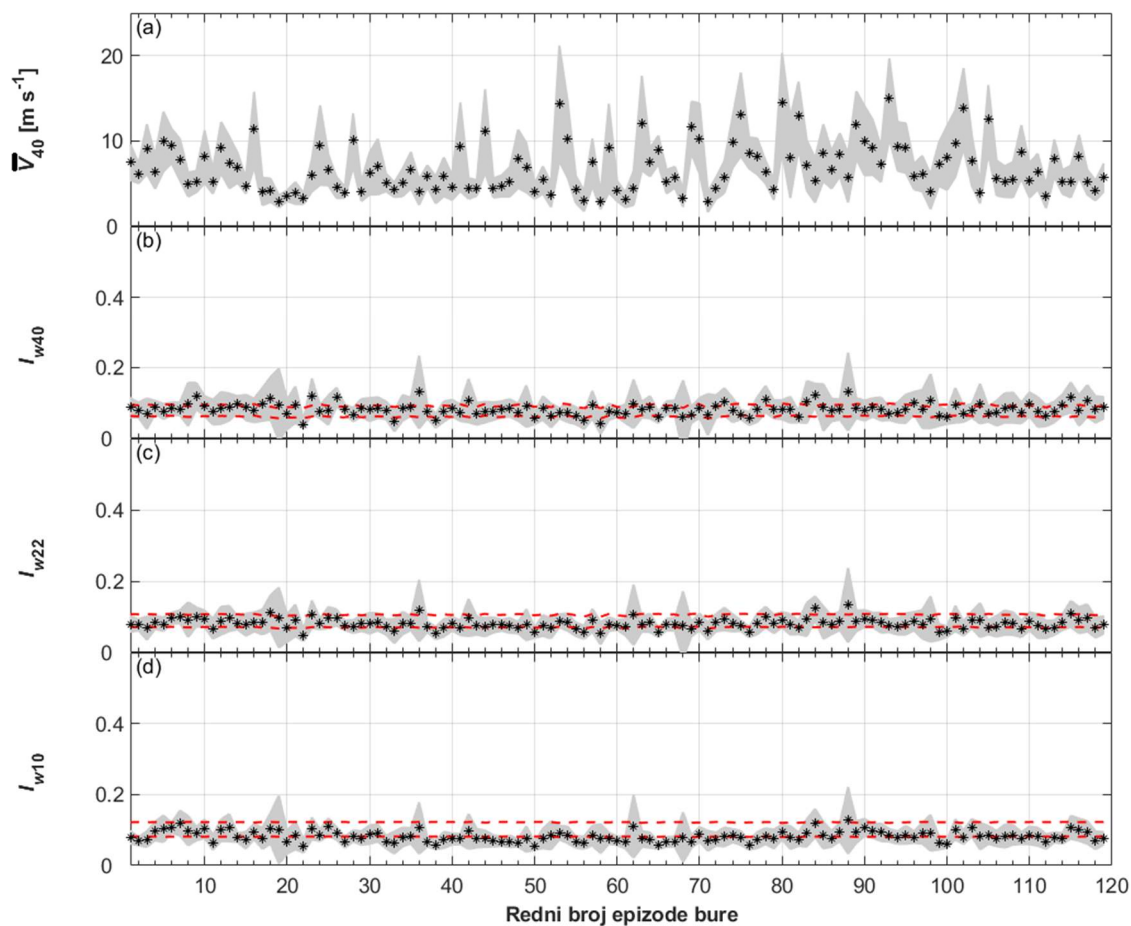
Usrednjavanjem rezultata dobivenih za svih 119 epizoda bure, trendovi se bitno ne mijenjaju. Na temelju jedne epizode bure pokazano je da su vrijednosti intenziteta turbulencije za sve tri komponente brzine neovisne o periodu usrednjavanja pa su proračuni za svih 119 epizoda bure provedeni samo za period usrednjavanja od 17 min. Slike 44-46 prikazuju za svaku epizodu bure po jednu usrednjenu vrijednost intenziteta turbulencije u  $x$ -,  $y$ - i  $z$ -smjeru na sve tri visine te usrednjenu vrijednost brzine vjetra na visini 40 m. Dobivene vrijednosti su uspoređene s vrijednostima iz ESDU 85020 (1985) dane za  $z_0 = 0,03$  m. Vrijednosti sve tri komponente intenziteta turbulencije se smanjuju s povećanjem visine od tla. Dobivene usrednjene vrijednosti  $I_u$  i  $I_v$  većinom su u rasponu od 0,1 do 0,2, dok su vrijednosti  $I_w$  manje i raspršene oko 0,1. Prilično male vrijednosti standardne devijacije za sve tri komponente upućuje na malo rasipanje vrijednosti oko usrednjene vrijednosti na sve tri visine. Kada se dobivene vrijednosti usporede s vrijednostima iz ESDU 85020 (1985), može se primijetiti da se usrednjene vrijednosti svih triju komponenti intenziteta turbulencije dobro podudaraju s ESDU 85020 (1985) vrijednostima (Lepri i sur., 2017).



Slika 44: (a) Usrednjena vrijednost brzine vjetra na visini 40 m; intenzitet turbulencije u x-smjeru na visini (b) 40 m; (c) 22 m i (d) 10 m. Legenda: crna zvjezdica - usrednjena vrijednost brzine vjetra na 40 m i intenziteta turbulencije kroz cijeli vremenski zapis za svaku pojedinu epizodu bure; sivo zasjenjeno područje - standardna devijacija brzine vjetra i intenziteta turbulencije za svaku epizodu bure; crvena točkasta krivulja - vrijednosti ESDU 85020 (1985) za  $z_0 = 0,03$  m s rasponom tolerancije  $\pm 20\%$ ; vrijednosti iz ESDU 85020 (1985) računane su za svaku epizodu bure zasebno.

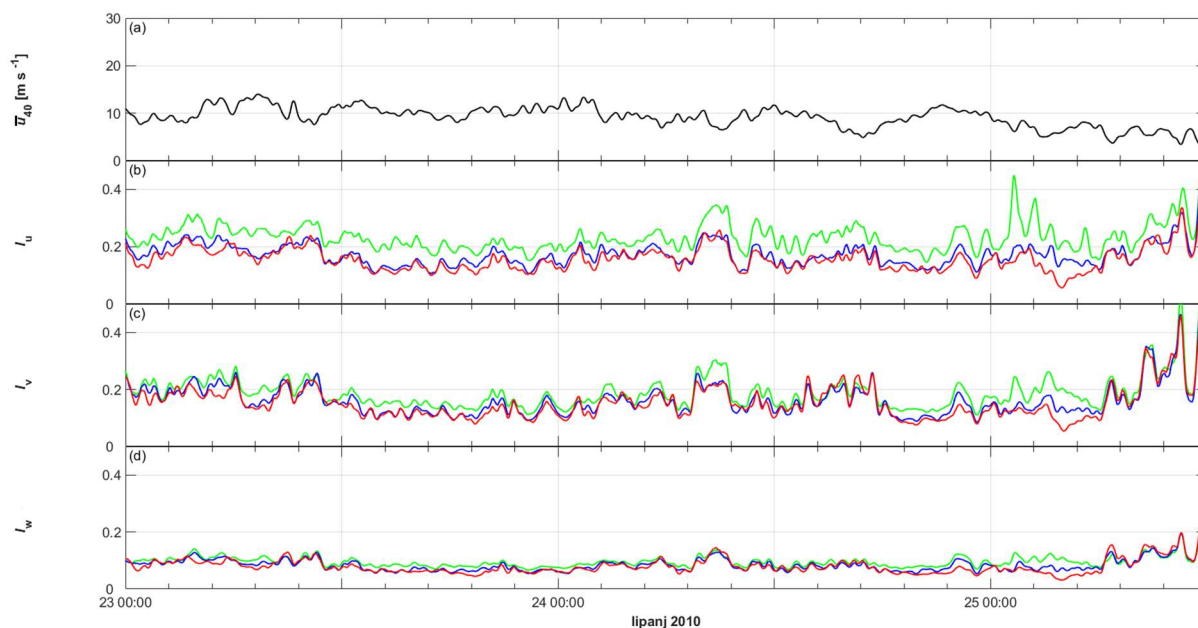


Slika 45: Isto kao Slika 44, ali za intenzitet turbulencije u y-smjeru

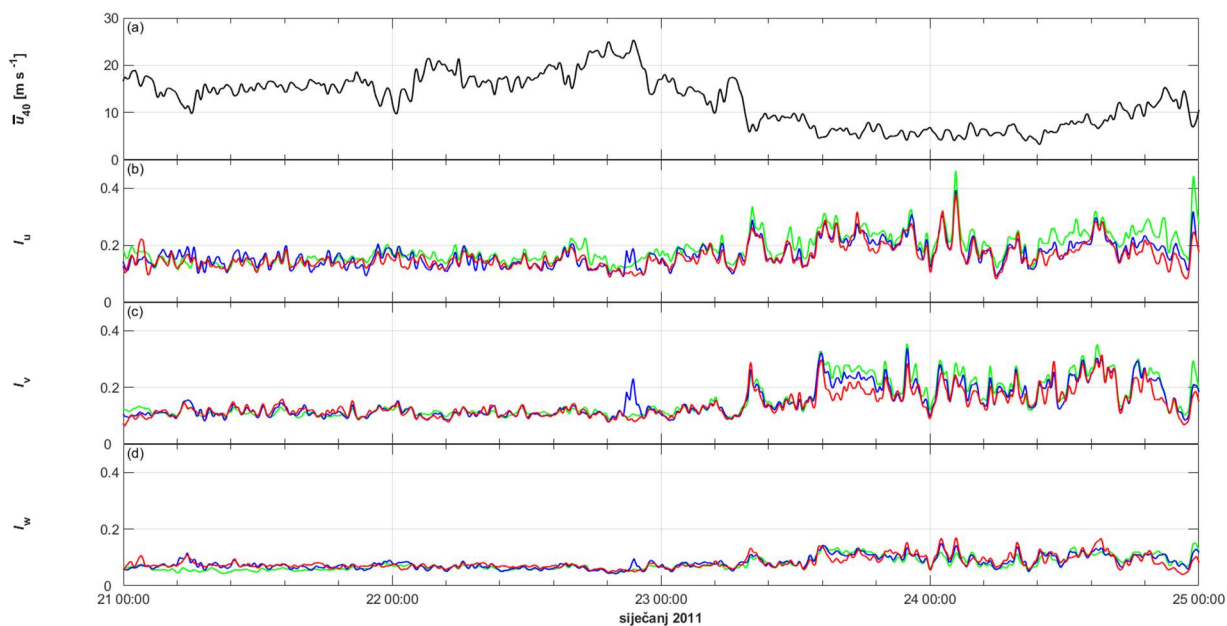


Slika 46: Isto kao Slika 44, ali za intenzitet turbulencije u z-smjeru

Na Slikama 47 i 48 prikazani su vremenski nizovi usrednjene vrijednosti brzine vjetra i sve tri komponente intenziteta turbulencije na sve tri ispitivane visine za ljetnu epizodu bure #12 i zimsku epizodu bure #63. Intenzitet turbulencije poprima najveće vrijednosti na najnižoj visini od 10 m što je u skladu sa zakonima atmosfere fizike. Za usrednjene vrijednosti brzine vjetra veće od  $5 \text{ m s}^{-1}$  intenzitet turbulencije poprima približno konstantne vrijednosti, dok za vrijeme manjih brzina vjetra te vrijednosti počinju značajno varirati. Usrednjene i maksimalne brzine vjetra su veće tijekom zimskih bura nego tijekom ljeta. Za vrijeme zimskog perioda s većim brzinama vjetra, sve tri komponente intenziteta turbulencije su približno konstantne i počinju fluktuirati tek kod brzina manjih od  $5 \text{ m s}^{-1}$ . Nasuprot tome, ljetne brzine vjetra su manje pa su vrijednosti intenziteta turbulencije veće nego zimi s naglašenijim fluktuacijama pri brzinama vjetra manjih od  $5 \text{ m s}^{-1}$ . Također, intenziteti turbulencije  $I_u$  i  $I_v$  za vrijeme ljetne bure poprimaju slične vrijednosti, dok su kod zimske bure vrijednosti  $I_u$  veće od vrijednosti  $I_v$ . Niti u jednom godišnjem dobu nema izraženog dnevnog hoda bure na proučavanom lokalitetu (Lepri i sur., 2017)..



Slika 47: Vremenski niz (a) klizno usrednjene brzine vjetra u  $x$ -smjeru s periodom usrednjavanja 17 min na visini 40 m; (b) intenzitet turbulencije u  $x$ -smjeru; (c) intenzitet turbulencije u  $y$ -smjeru; (d) intenzitet turbulencije u  $z$ -smjeru. Legenda: zelena krivulja – intenzitet turbulencije na visini 10 m, plava krivulja – intenzitet turbulencije na visini 22 m, crvena krivulja – intenzitet turbulencije na visini 40 m za ljetnu epizodu bure #12.



Slika 48: Isto kao Slika 47, ali za zimsku epizodu bure #63.

#### 4.4 Reynoldsovo smično naprezanje

Preliminarno istraživanje značajki Reynoldsovog smičnog naprezanja tijekom bure provedeno je na primjeru ljetne bure #16. Komponente Reynoldsovog smičnog naprezanja  $-\overline{\rho u'v'}$ ,  $-\overline{\rho u'w'}$ ,  $-\overline{\rho v'w'}$  izračunate su proračunom kliznih usrednjenih vrijednosti umnoška perturbacija brzina vjetra za svaku visinu zasebno za sve četiri vrijednosti perioda usrednjavanja.

U Tablicama 19 - 22 prikazani su statistički parametri za Reynoldsovo smično naprezanje u ovisnosti o periodu usrednjavanja.

Tablica 19: Statistički podaci za Reynoldsovo smično naprezanje na visini 10 m, 22 m i 40 m za period usrednjavanja 5 min za ljetnu buru #16

Statistički parametar	Visina								
	10 m			22 m			40 m		
	$-\frac{\overline{u'w'}}{\bar{u}_{10}^2}$	$-\frac{\overline{u'v'}}{\bar{u}_{10}^2}$	$-\frac{\overline{v'w'}}{\bar{u}_{10}^2}$	$-\frac{\overline{u'w'}}{\bar{u}_{22}^2}$	$-\frac{\overline{u'v'}}{\bar{u}_{22}^2}$	$-\frac{\overline{v'w'}}{\bar{u}_{22}^2}$	$-\frac{\overline{u'w'}}{\bar{u}_{40}^2}$	$-\frac{\overline{u'v'}}{\bar{u}_{40}^2}$	$-\frac{\overline{v'w'}}{\bar{u}_{40}^2}$
<b>Medijan</b>	0,005	0,002	0,002	0,002	-0,001	0,004	0,002	-0,000	0,002
<b>Aritmetička sredina</b>	0,006	0,003	0,003	0,003	-0,000	0,005	0,002	0,000	0,003
<b>Minimalna vrijednost</b>	-0,073	-0,123	-0,010	-0,044	-0,071	-0,006	-0,147	-0,073	-0,014
<b>Maksimalna vrijednost</b>	0,057	1,673	0,173	0,129	1,597	0,192	0,197	1,922	0,143
<b>Standardna devijacija</b>	0,004	0,035	0,005	0,004	0,031	0,006	0,005	0,033	0,006

Tablica 20: Statistički podaci za Reynoldsovo smično naprezanje na visini 10 m, 22 m i 40 m za period usrednjavanja 8 min za ljetnu buru #16

Statistički parametar	Visina								
	10 m			22 m			40 m		
	$-\frac{\overline{u'w'}}{\bar{u}_{10}^2}$	$-\frac{\overline{u'v'}}{\bar{u}_{10}^2}$	$-\frac{\overline{v'w'}}{\bar{u}_{10}^2}$	$-\frac{\overline{u'w'}}{\bar{u}_{22}^2}$	$-\frac{\overline{u'v'}}{\bar{u}_{22}^2}$	$-\frac{\overline{v'w'}}{\bar{u}_{22}^2}$	$-\frac{\overline{u'w'}}{\bar{u}_{40}^2}$	$-\frac{\overline{u'v'}}{\bar{u}_{40}^2}$	$-\frac{\overline{v'w'}}{\bar{u}_{40}^2}$
<b>Medijan</b>	0,006	0,003	0,002	0,002	-0,001	0,004	0,002	-0,000	0,002
<b>Aritmetička sredina</b>	0,006	0,003	0,003	0,003	-0,000	0,005	0,002	0,000	0,003
<b>Minimalna vrijednost</b>	-0,011	-0,082	-0,009	-0,017	-0,050	-0,007	-0,028	-0,051	-0,011
<b>Maksimalna vrijednost</b>	0,035	0,516	0,044	0,063	0,461	0,047	0,056	0,437	0,054
<b>Standardna devijacija</b>	0,003	0,020	0,003	0,003	0,017	0,004	0,003	0,016	0,005

Tablica 21: Statistički podaci za Reynoldsovo smično naprezanje na visini 10 m, 22 m i 40 m za period usrednjavanja 17 min za ljetnu buru #16

Statistički parametar	Visina								
	10 m			22 m			40 m		
	$-\frac{\overline{u'w'}}{\bar{u}_{10}^2}$	$-\frac{\overline{u'v'}}{\bar{u}_{10}^2}$	$-\frac{\overline{v'w'}}{\bar{u}_{10}^2}$	$-\frac{\overline{u'w'}}{\bar{u}_{22}^2}$	$-\frac{\overline{u'v'}}{\bar{u}_{22}^2}$	$-\frac{\overline{v'w'}}{\bar{u}_{22}^2}$	$-\frac{\overline{u'w'}}{\bar{u}_{40}^2}$	$-\frac{\overline{u'v'}}{\bar{u}_{40}^2}$	$-\frac{\overline{v'w'}}{\bar{u}_{40}^2}$
<b>Medijan</b>	0,006	0,004	0,002	0,003	0,000	0,004	0,002	0,000	0,002
<b>Aritmetička sredina</b>	0,006	0,004	0,003	0,003	0,001	0,005	0,002	0,001	0,003
<b>Minimalna vrijednost</b>	-0,000	-0,039	-0,001	-0,013	-0,032	-0,003	-0,022	-0,045	-0,007
<b>Maksimalna vrijednost</b>	0,024	0,297	0,029	0,023	0,269	0,035	0,022	0,235	0,045
<b>Standardna devijacija</b>	0,003	0,017	0,003	0,003	0,015	0,004	0,003	0,013	0,004

Tablica 22: Statistički podaci za Reynoldsovo smično naprezanje na visini 10 m, 22 m i 40 m za period usrednjavanja 20 min za ljetnu buru #16

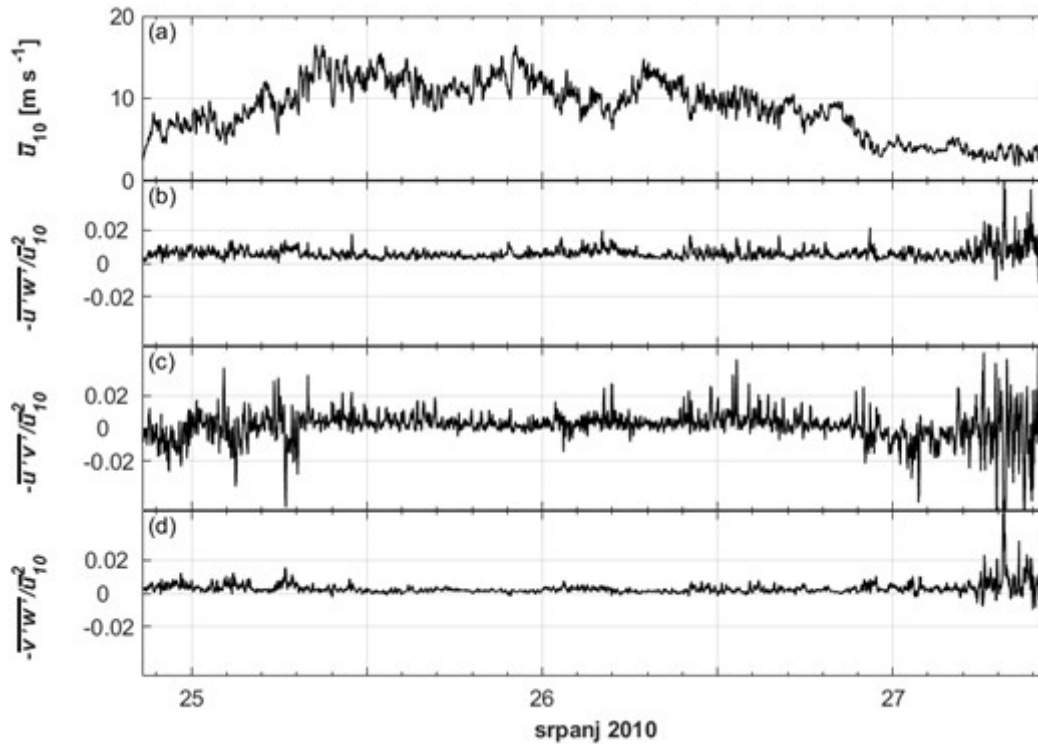
Statistički parametar	Visina								
	10 m			22 m			40 m		
	$-\frac{\overline{u'w'}}{\bar{u}_{10}^2}$	$-\frac{\overline{u'v'}}{\bar{u}_{10}^2}$	$-\frac{\overline{v'w'}}{\bar{u}_{10}^2}$	$-\frac{\overline{u'w'}}{\bar{u}_{22}^2}$	$-\frac{\overline{u'v'}}{\bar{u}_{22}^2}$	$-\frac{\overline{v'w'}}{\bar{u}_{22}^2}$	$-\frac{\overline{u'w'}}{\bar{u}_{40}^2}$	$-\frac{\overline{u'v'}}{\bar{u}_{40}^2}$	$-\frac{\overline{v'w'}}{\bar{u}_{40}^2}$
<b>Medijan</b>	0,006	0,004	0,002	0,003	0,000	0,004	0,002	0,000	0,002
<b>Aritmetička sredina</b>	0,006	0,005	0,003	0,003	0,001	0,005	0,002	0,001	0,003
<b>Minimalna vrijednost</b>	-0,004	-0,042	-0,000	-0,014	-0,038	-0,003	-0,022	-0,042	-0,007
<b>Maksimalna vrijednost</b>	0,025	0,235	0,028	0,022	0,210	0,032	0,023	0,177	0,037
<b>Standardna devijacija</b>	0,003	0,015	0,003	0,003	0,013	0,004	0,003	0,010	0,004

Može se primijetiti da medijan dominantne komponente Reynoldsovog smičnog naprezanja  $-\overline{u'w'}$  normirane pripadajućom usrednjenom vrijednosti brzine vjetra u x-smjeru uz konstantnu gustoću zraka poprima vrijednosti u rasponu od 0,005 do 0,006 na visini 10 m, od 0,002 do 0,003 na 22 m, i oko 0,002 na 40 m. Medijan normirane komponente Reynoldsovog smičnog naprezanja  $-\overline{u'v'}$  poprima vrijednosti od 0,002 do 0,004 na visini 10 m, od -0,001 do 0,000 na 22 m, i 0,000 na visini 40 m. Vrijednosti medijana za normirane vrijednosti komponente Reynoldsovog smičnog naprezanja  $-\overline{v'w'}$  raspršene su oko vrijednosti 0,002 na visini 10 m, 0,004 na 22 m, i 0,002 na 40 m. Za sve tri komponente Reynoldsovog smičnog naprezanja postoji dobra podudarnost između vrijednosti medijana i aritmetičke sredine.

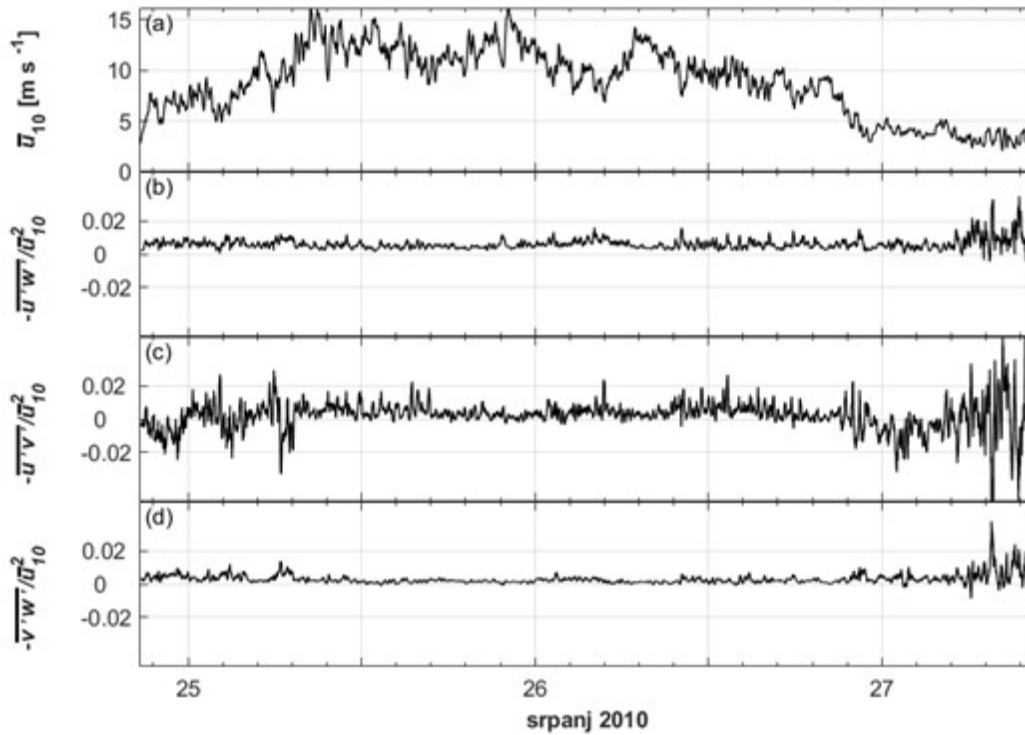


Vrijednosti normiranih komponenti  $-\overline{u'w'}$  i  $-\overline{u'v'}$  uglavnom opadaju s povećanjem visine. Standardna devijacija normiranih komponenti  $-\overline{u'w'}$  i  $-\overline{v'w'}$  od 0,003 do 0,006 za sva četiri perioda usrednjavanja ukazuje na činjenicu da su podaci umjereno raspršeni oko pripadajuće im usrednjene vrijednosti. Istovremeno su standardne devijacije normirane komponente  $-\overline{u'v'}$  značajno veće, s vrijednostima od 0,010 do 0,035, što upućuje na veće rasipanje podataka oko aritmetičke sredine u odnosu na preostale dvije komponente.

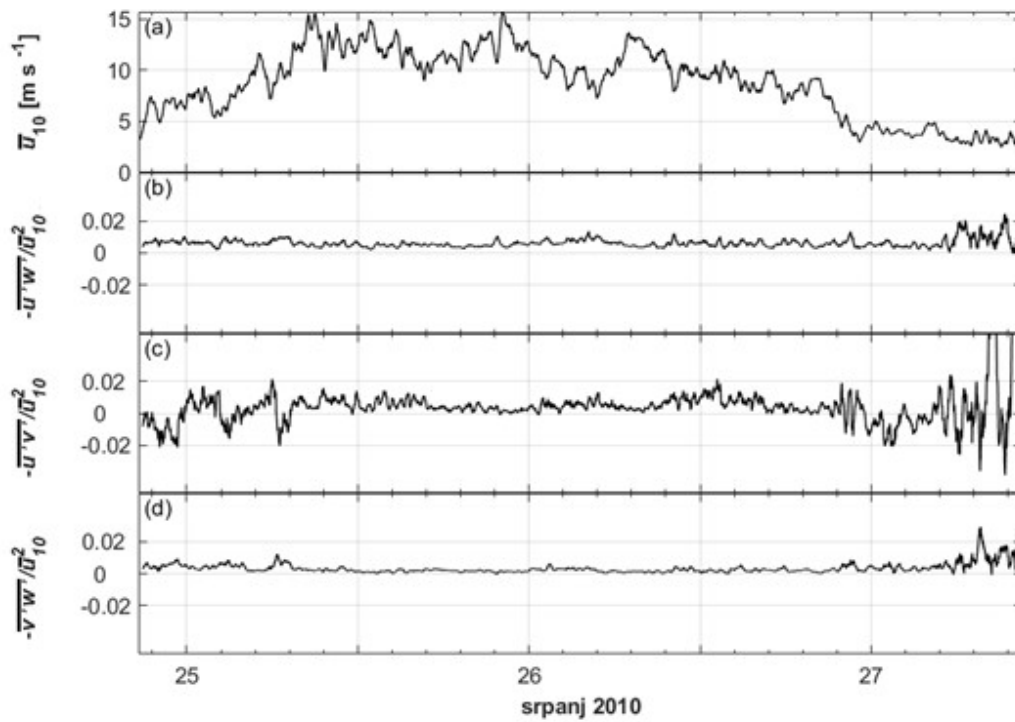
Da bi se usporedila ovisnost Reynoldsovog smičnog naprezanja o usrednjenj brzini vjetra, na Slikama 49 - 60 prikazani su vremenski nizovi usrednjene brzine vjetra u  $x$ -smjeru i normiranih komponenti Reynoldsovog smičnog naprezanja za periode usrednjavanja 5 min, 8 min, 17 min i 20 min. Može se uočiti da se vremenski nizovi za različite periode usrednjavanja međusobno značajno ne razlikuju. Prikaz komponenti Reynoldsovog smičnog naprezanja potvrđuje statističke podatke dane u Tablicama 19 – 22. Komponenta  $-\overline{u'w'}$  je najizraženija komponenta, a komponenta  $-\overline{u'v'}$  je obilježena najvećom disperzijom podataka, što je posebno izraženo kod malih usrednjenih brzine vjetra u  $x$ -smjeru, moguće zbog izraženijeg utjecaja značajki terena u ovom režimu strujanja. Slično kao za intenzitet turbulencije, sve tri komponente Reynoldsovog smičnog naprezanja približno su konstantne kada je usrednjena brzina vjetra veća od  $\sim 5 \text{ m s}^{-1}$ . Nema utjecaja izmjene dana i noći na dobivene vrijednosti (Lepri i sur., 2015).



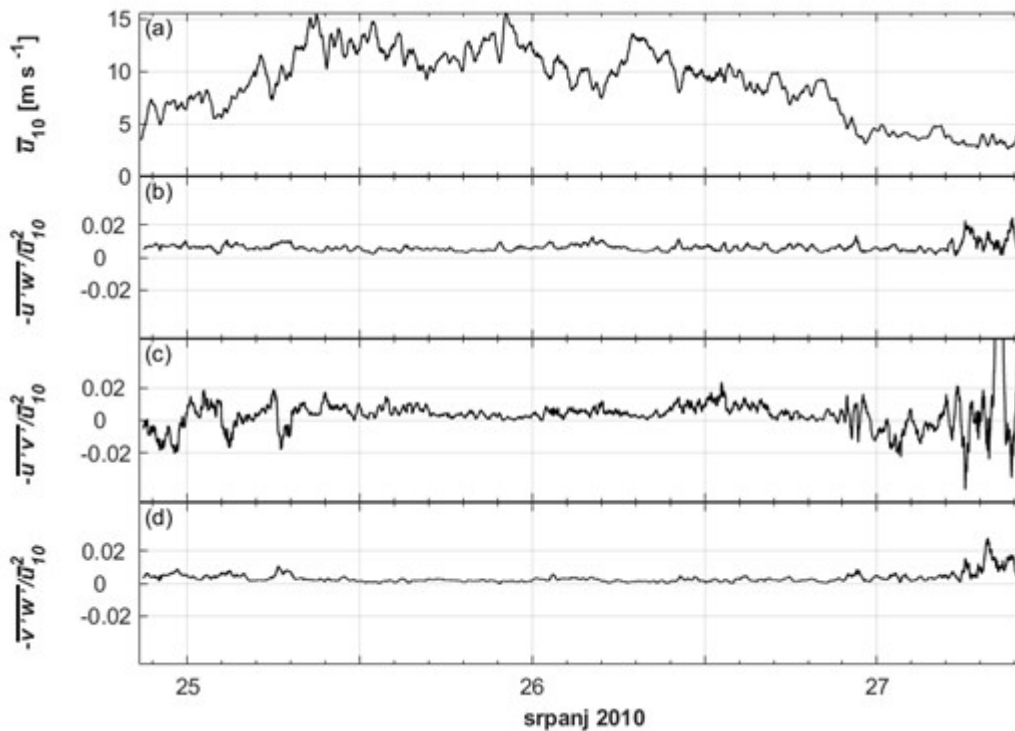
Slika 49: a) Klizno usrednjena brzina vjetra u  $x$ -smjeru s periodom usrednjavanja 5 min na visini 10 m; vremenski niz komponenti Reynoldsovog smičnog naprezanja (b)  $-\overline{u'w'}$ , (c)  $-\overline{u'v'}$ , (d)  $-\overline{v'w'}$  normiranih usrednjenom brzinom vjetra u  $x$ -smjeru na visini 10 m pri periodu usrednjavanja od 5 min.



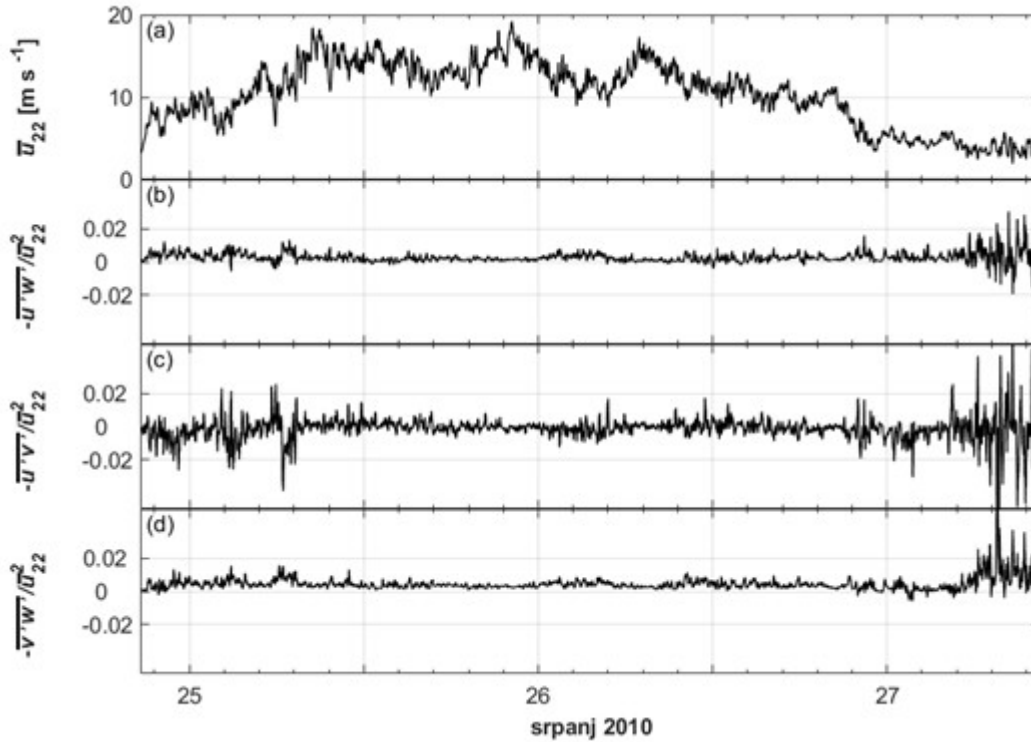
Slika 50: Isto kao Slika 49, ali za period usrednjavanja 8 min.



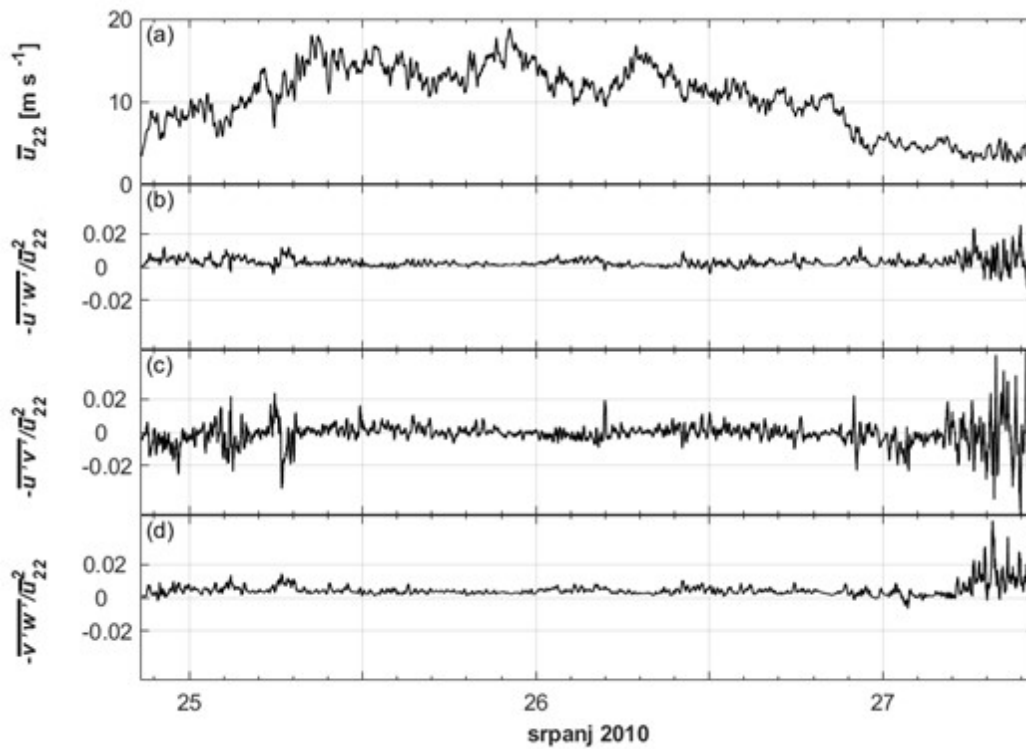
Slika 51: Isto kao Slika 49, ali za period usrednjanja 17 min.



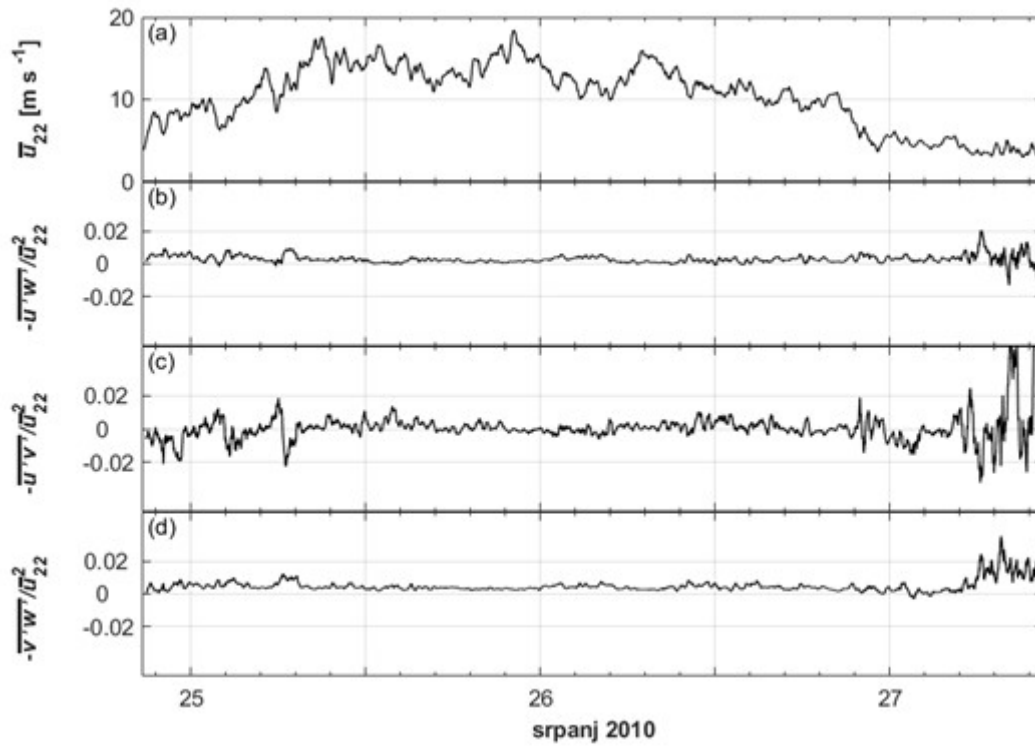
Slika 52: Isto kao Slika 49, ali za period usrednjanja 20 min.



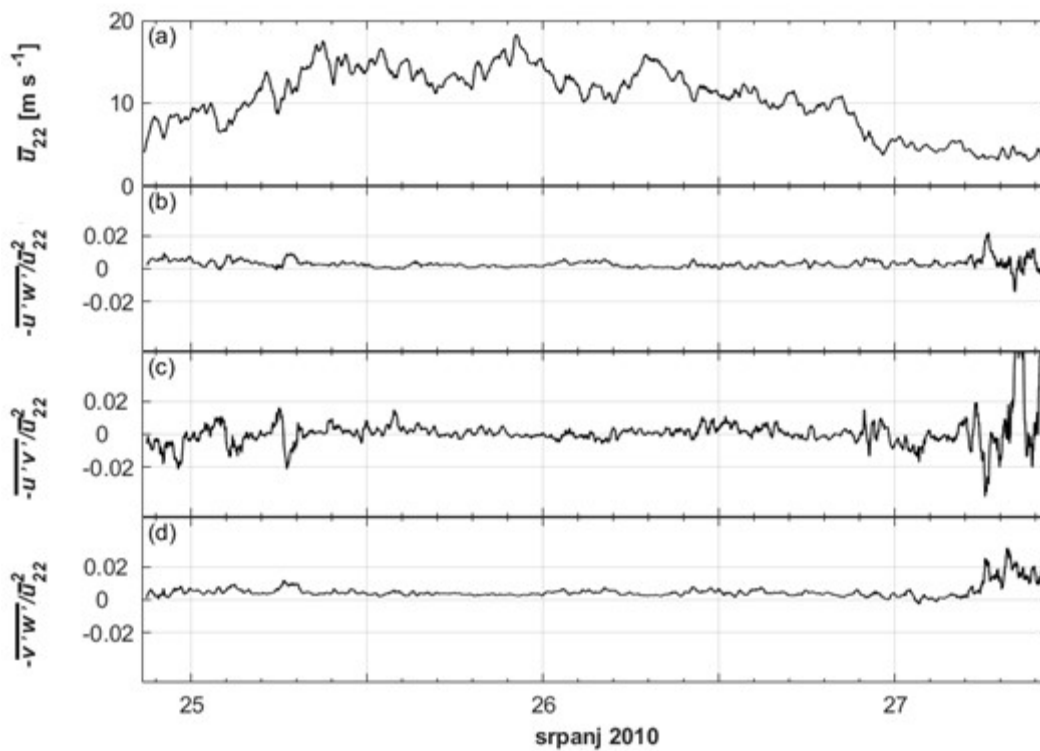
Slika 53: a) Klizno usrednjena brzina vjetra u  $x$ -smjeru s periodom usrednjavanja 5 min na visini 22 m; vremenski niz komponenti Reynoldsovog smičnog naprežanja (b)  $-\overline{u'w'}$ , (c)  $-\overline{u'v'}$ , (d)  $-\overline{v'w'}$  normiranih usrednjenom brzinom vjetra u  $x$ -smjeru na visini 22 m pri periodu usrednjavanja 5 min.



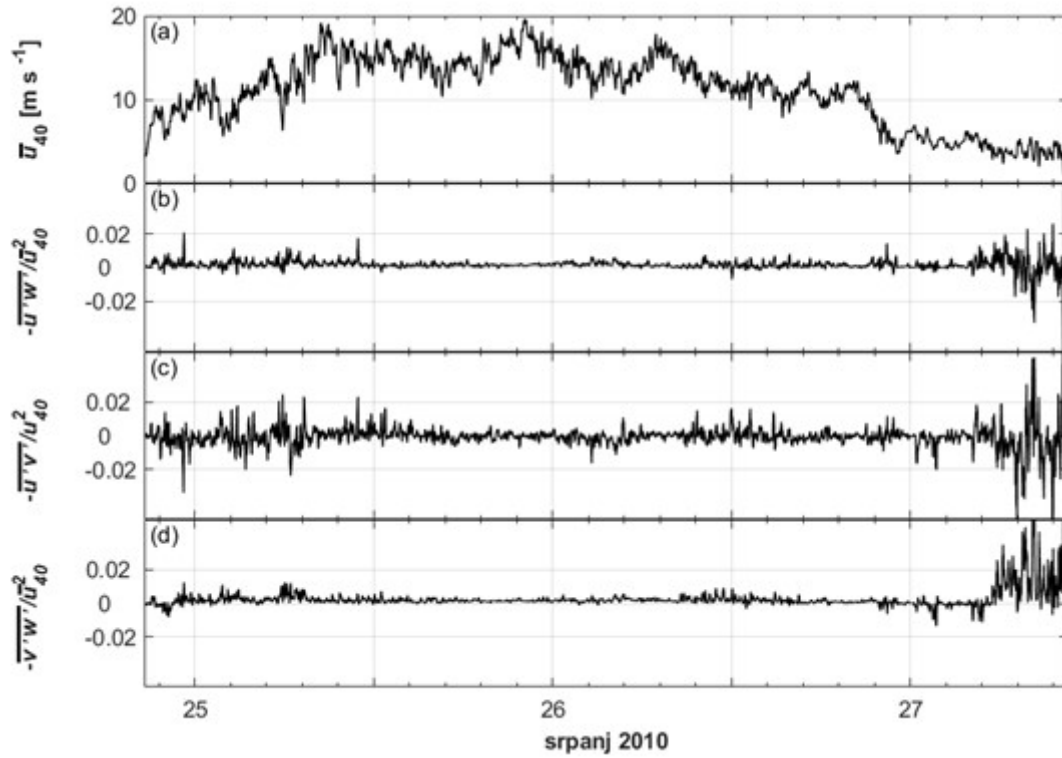
Slika 54: Isto kao Slika 53, ali za period usrednjavanja 8 min.



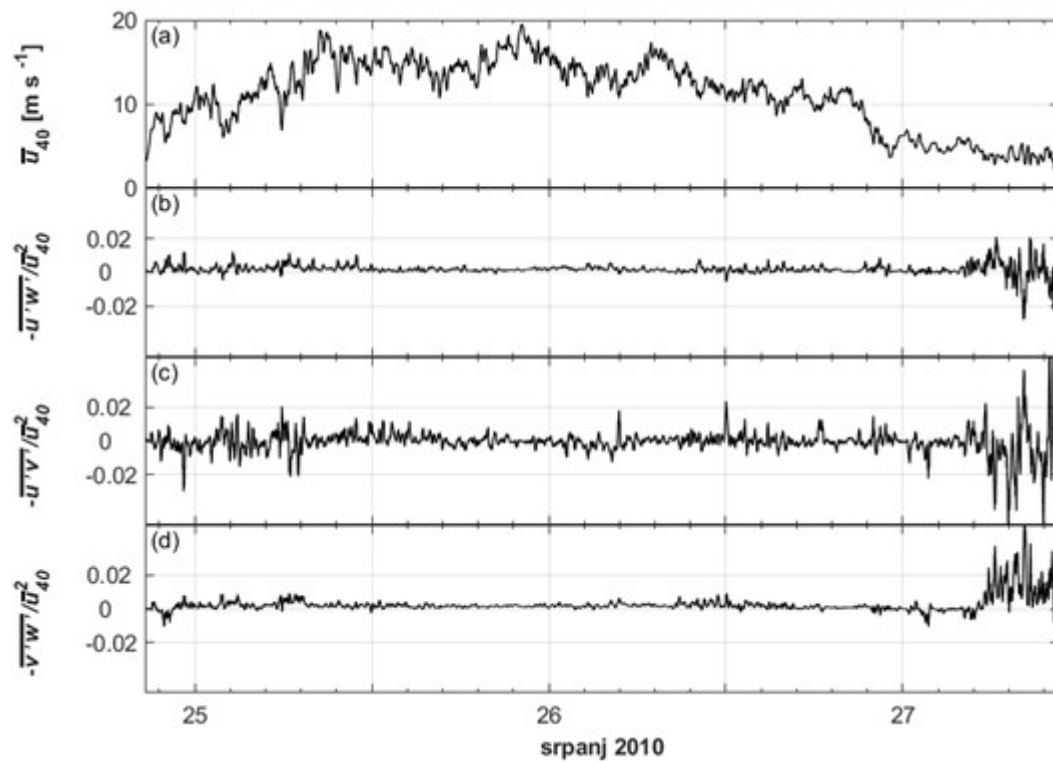
Slika 55: Isto kao Slika 53, ali za period usrednjavanja 17 min.



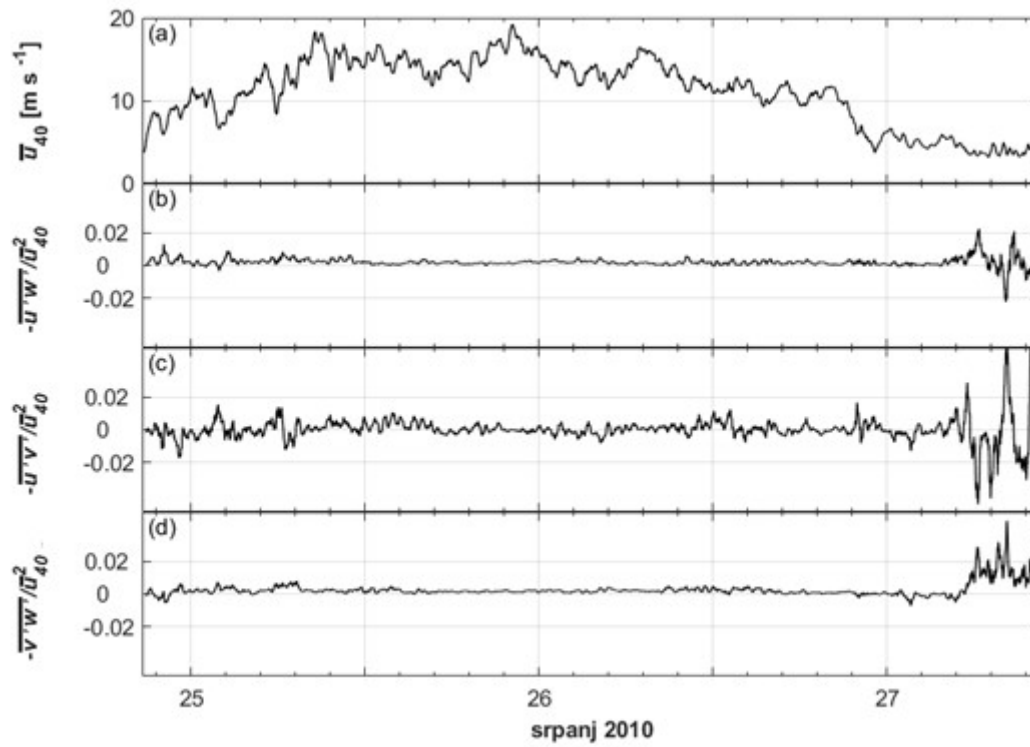
Slika 56: Isto kao Slika 53, ali za period usrednjavanja 20 min.



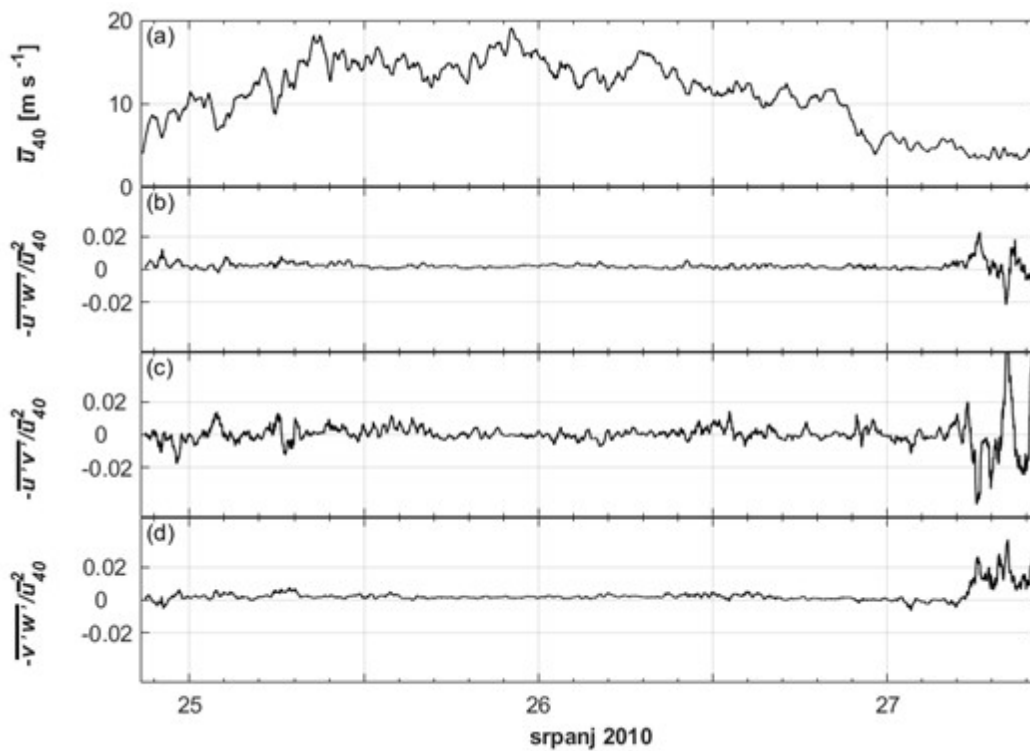
Slika 57: (a) Klizno usrednjena brzina vjetra u  $x$ -smjeru s periodom usrednjavanja 5 min na visini 40 m; vremenski niz komponenti Reynoldsovog smičnog naprezanja (b)  $-\overline{u'w'}$ , (c)  $-\overline{u'v'}$ , (d)  $-\overline{v'w'}$  normiranih usrednjenom brzinom vjetra u  $x$ -smjeru na visini 40 m pri periodu usrednjavanja 5 min.



Slika 58: Isto kao Slika 57, ali za period usrednjavanja 8 min.



Slika 59: Isto kao Slika 57, ali za period usrednjavanja 17 min.



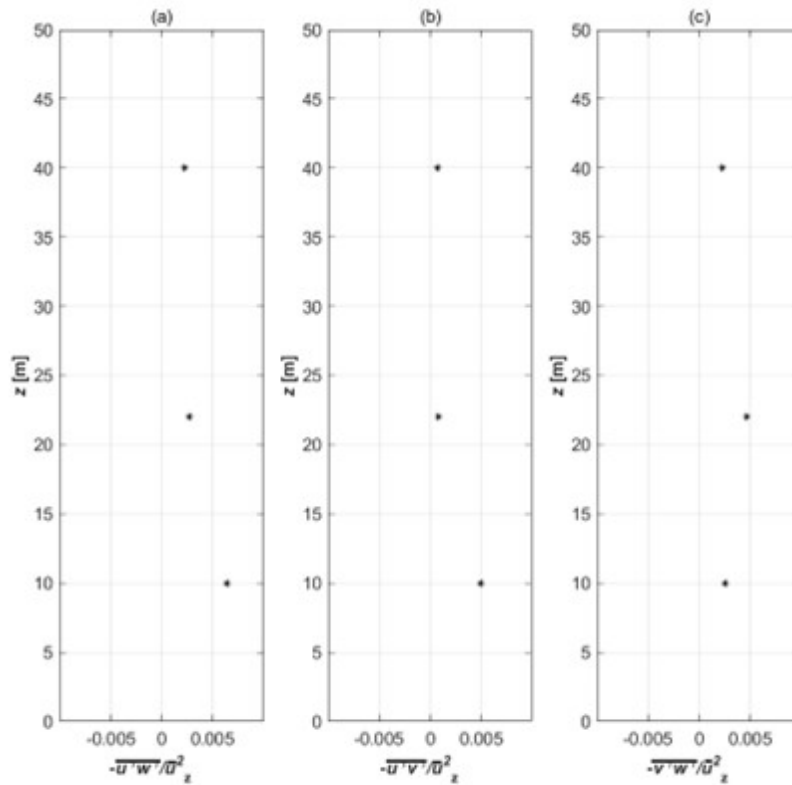
Slika 60: Isto kao Slika 57, ali za period usrednjavanja 20 min.

Vertikalni profili komponenti Reynoldsovog smičnog naprezanja normirani usrednjenom brzinom vjetra na odgovarajućoj visini pri periodu usrednjavanja 17 min prikazani su na Slici 61. Za preostala tri analizirana perioda usrednjavanja vertikalni profili komponenti Reynoldsovog smičnog naprezanja imaju jednake trendove kao na Slici 61 te stoga nisu prikazani.

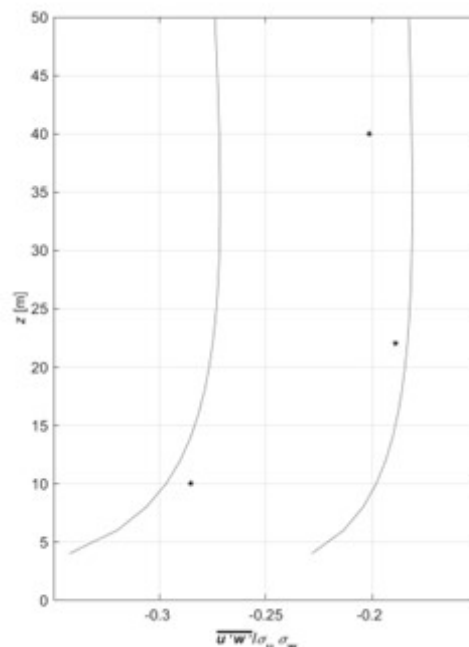
Vertikalni profili komponenti  $-\overline{u'w'}$  i  $-\overline{u'v'}$  Reynoldsovog smičnog naprezanja su obilježeni padom vrijednosti s porastom visine. Približno jednake vrijednosti komponente  $-\overline{u'w'}$  na visinama 22 m i 40 m upućuju na moguće postojanje Prandtlovog sloja stalnog toka. Komponenta  $-\overline{v'w'}$  na visini 22 m pokazuje neočekivano ponašanje što upućuje na značajnu izmjenu količine gibanja između lateralne i vertikalne komponente fluktuacije brzine. Moguće je da je uzrok vrlo lokalna značajka terena oko meteorološkog tornja na kojemu su provedena mjerenja, npr. elementi površinske hrapavosti. Na slično anomalno ponašanje komponente  $-\overline{v'w'}$  ukazali su Babić i sur. (2016).

Usporedba vrijednosti komponente  $-\overline{u'w'}$  normiranih pripadajućim varijancama i ESDU85020 (1985) podataka za  $z_0=0,03$  m uz raspon tolerancije  $\pm 20\%$  dana je na Slici 62. Izmjerena vrijednost usrednjena je tijekom cjelokupnog perioda mjerenja te na svakoj visini jedna vrijednost predstavlja ukupnu usrednjenu vrijednost na toj visini. U ovom slučaju može se zaključiti da se dobivene vrijednosti dobro podudaraju s ESDU85020 (1985) vrijednostima koje odgovaraju zemljištu s ponekim drvetom i živicom s izoliranim zgradama za ljetnu buru #16 (Lepri i sur., 2015).



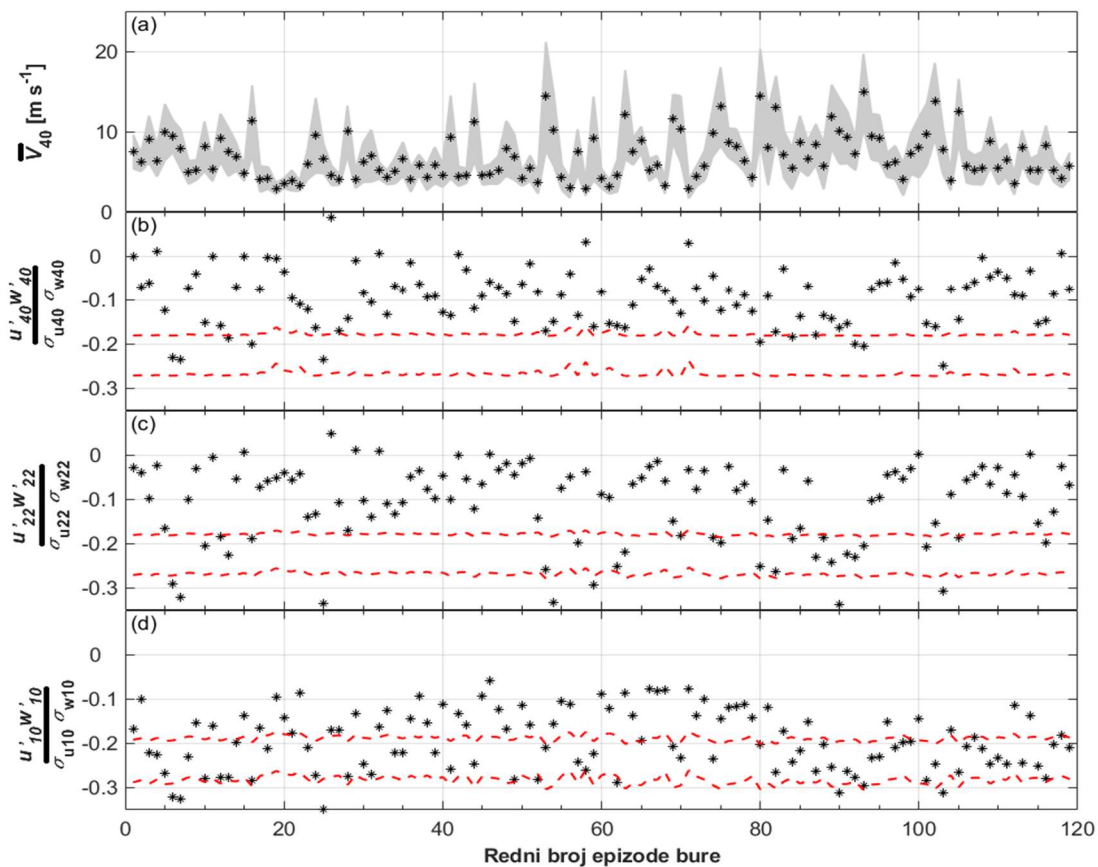


Slika 61: Vertikalni profili komponenti (a)  $-\overline{u'w'}$ , (b)  $-\overline{u'v'}$ , (c)  $-\overline{v'w'}$  Reynoldsovog smičnog naprezanja za period usrednjavanja 17 min izračunati kroz cjelokupan vremenski zapis proučavane epizode bure normirani usrednjenom brzinom vjetera u  $x$ -smjeru pri periodu usrednjavanja 17 min.



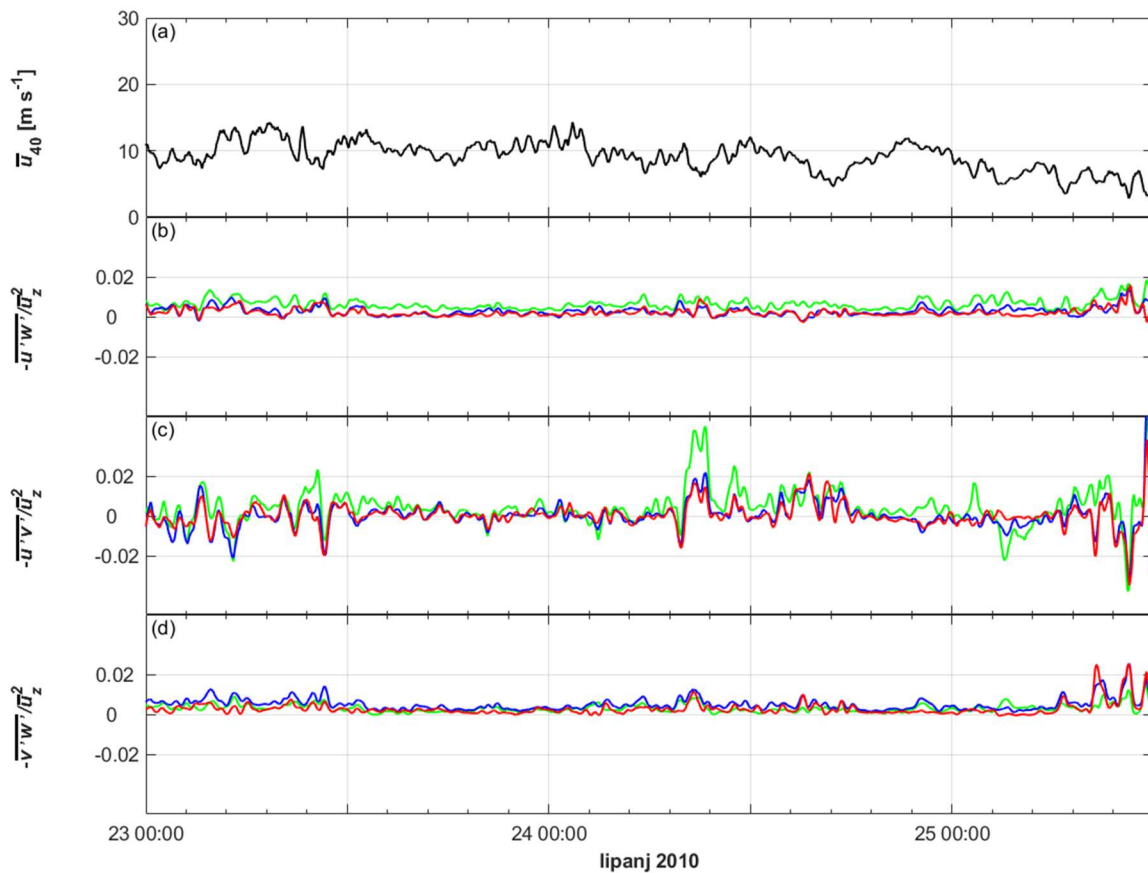
Slika 62: Vertikalni profil komponente Reynoldsovog smičnog naprezanja uspoređeni s vrijednostima iz ESDU 85020 (1985) za  $z_0=0,03$  m uz raspon tolerancije  $\pm 20\%$ . Legenda: zvjezdica - usrednjena vrijednost promatranog  $\overline{u'w'}/\sigma_u\sigma_w$ , usrednjena kroz cijeli vremenski zapis za promatranu epizodu bure, siva krivulja - ESDU 85020 (1985).

Analize svih 119 epizoda bure provedene na jednak način kao i što je bio slučaj samo za jednu epizodu bure pri periodu usrednjavanja od 17 min pokazuju da se za usrednjene vrijednosti trendovi bitno ne mijenjaju. Na Slici 63 prikazano je Reynoldsovo smično naprezanje na sve tri promatrane visine i usrednjene brzine vjetra na 40 m u usporedbi s vrijednostima danim u ESDU 85020 (1985) za  $z_0 = 0,03$  m. Vrijednosti izmjerene na meteorološkom tornju ne podudaraju se s vrijednostima preporučenim u ESDU 85020 (1985) za  $z_0 = 0,03$  m. Moguće je da je uzrok ovom fenomenu povezan s utjecajem kompleksnog terena, što je potrebno još detaljnije proučiti u okvirima budućih istraživanja. Iako je na primjeru ljetne bure #16 pokazano da se dobivene vrijednosti Reynoldsovog smičnog naprezanja dobro podudaraju s ESDU85020 (1985) vrijednostima koje odgovaraju zemljištu s ponekim drvetom i živicom s izoliranim zgradama, kada se promatra svih 119 epizoda bure izračunate apsolutne vrijednosti uglavnom su manje od ESDU 85020 (1985) vrijednosti, pri čemu je podudarnost veća na manjim visinama od tla (Lepri i sur., 2017).

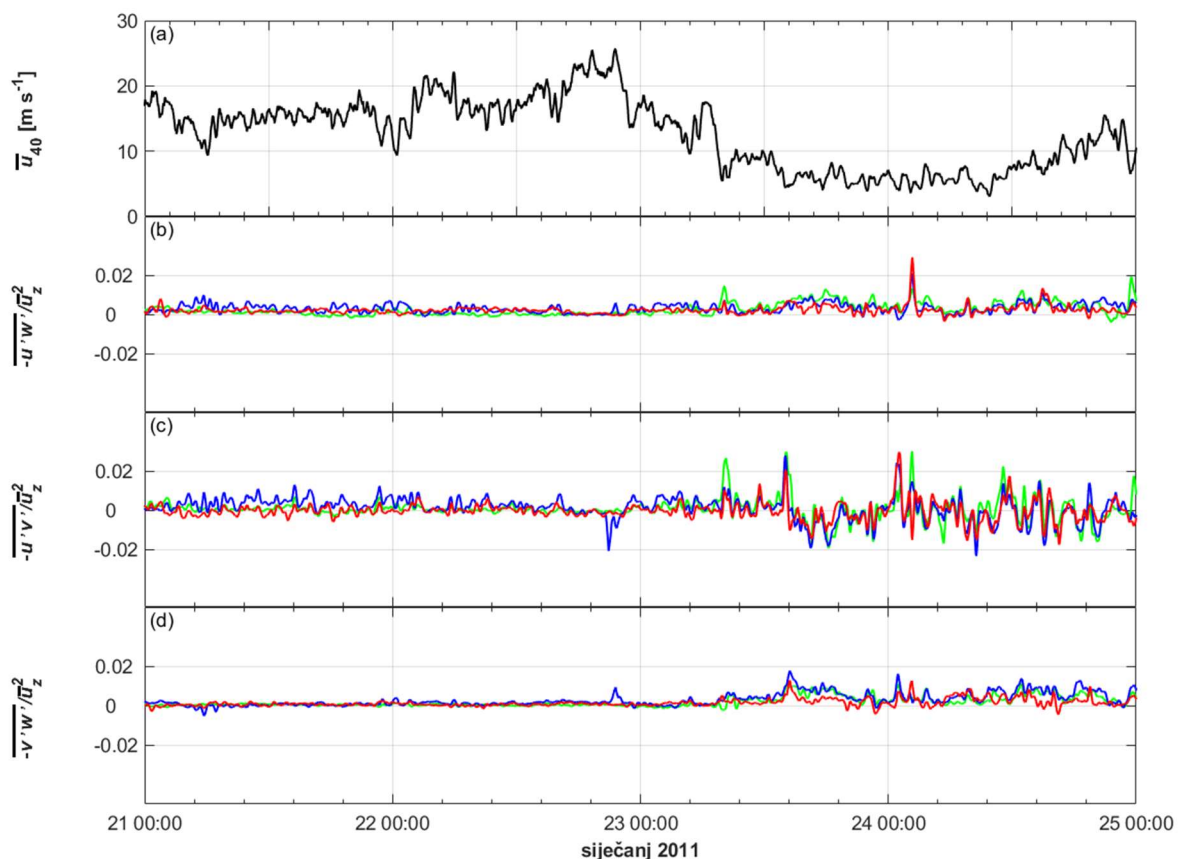


Slika 63: (a) Brzina vjetra na visini 40 m usrednjena kroz cijeli vremenski zapis za svaku pojedinu epizodu bure; Reynoldsovo smično naprezanje na visini (b) 40 m; (c) 22 m i (d) 10 m. Legenda: crna zvjezdica - usrednjena vrijednost  $\overline{u'w'}/\sigma_u\sigma_w$  usrednjena kroz cijeli vremenski zapis za svaku pojedinu epizodu bure; sivo zasjenjeno područje - standardna devijacija usrednjene brzine vjetra za svaku epizodu bure; crvena točkasta krivulja - vrijednosti ESDU 85020 (1985) za  $z_0 = 0,03$  m s rasponom tolerancije  $\pm 20\%$ ; vrijednosti iz standarda ESDU 85020 (1985) su računane za svaku epizodu bure zasebno.

Na Slikama 64 i 65 prikazane su tri komponente Reynoldsovog smičnog naprezanja za svaku visinu na kojoj su provedena mjerenja. Analizirane su zimska epizoda bure #63 i ljetna epizoda bure #12. Najizraženija komponenta je  $-\overline{u'w'}$ , dok je komponenta  $-\overline{u'v'}$  najraspršenija i tijekom zimske i ljetne epizode bure. U periodu većih brzina vjetra Reynoldsovo smično naprezanje poprima skoro konstantne vrijednosti što nije slučaj za vrijeme manjih brzina vjetra. Budući da je brzina vjetra veća u zimskom nego u ljetnom periodu, raspon vrijednosti za sve tri komponente Reynoldsovog smičnog naprezanja na sve tri visine je veći ljeti nego zimi. Ne postoji zamjetan dnevni hod (Lepri i sur., 2017).



Slika 64: Vremenski niz (a) klizno usrednjene brzine vjetra u  $x$ -smjeru s periodom usrednjavanja 17 min na visini 40 m; vremenski niz proračunatih komponenti Reynoldsovog smičnog naprezanja (b)  $-\overline{u'w'}$ , (c)  $-\overline{u'v'}$ , (d)  $-\overline{v'w'}$  normiranih kvadratom usrednjene vrijednosti brzine u  $x$ -smjeru na pripadajućoj visini. Legenda: zelena puna krivulja – Reynoldsovo smično naprezanje na visini 10 m, plava puna krivulja – Reynoldsovo smično naprezanje na visini 22 m, crvena puna krivulja – Reynoldsovo smično naprezanje na visini 40 m za ljetnu epizodu bure #12.



Slika 65: Vremenski niz (a) klizno usrednjene brzine vjetra  $x$ -smjeru s periodom usrednjavanja 17 min u na visini 40 m; vremenski niz proračunatih komponenti Reynoldsovog smičnog naprezanja (b)  $-\overline{u'w'}$ , (c)  $-\overline{u'v'}$ , (d)  $-\overline{v'w'}$  normiranih kvadratom usrednjene vrijednosti brzine u  $x$ -smjeru na pripadajućoj visini. Legenda: zelena puna krivulja – Reynoldsovo smično naprezanje na visini 10 m, plava puna krivulja – Reynoldsovo smično naprezanje na visini 22 m, crvena puna krivulja – Reynoldsovo smično naprezanje na visini 40 m za zimsku epizodu bure #63.

#### 4.5 Duljinske mjere turbulencije

Preliminarno istraživanje integralnih duljinskih mjera turbulencije provedeno je na ljetnoj epizodi bure #16. Za proračun duljinske mjere turbulencije u  $x$ -smjeru za  $u'$ ,  $v'$  i  $w'$  komponente prvo je potrebno potvrditi valjanost Taylorov hipoteze o zamrznutoj turbulenciji za slučaj analiziranih izmjerenih podataka. Ako je omjer između standardne devijacije usrednjene horizontalne brzine vjetra i usrednjene horizontalne brzine vjetra manji od 0,5 (npr. Stull, 1988), tada vrijedi pretpostavka Taylorove zamrznute turbulencije. Rezultati analize ukazuju da podaci zadovoljavaju zadane kriterije čime je potvrđena valjanost Taylorove hipoteze o zamrznutoj turbulenciji na sve tri visine te je moguće koristiti izraze (6) i (7) za proračun integralnih duljinskih mjera turbulencije. Funkcija korelacije je računata točku po točku kliznim blokovima duljine koja odgovara duljini primijenjenog perioda usrednjavanja (5 min, 8 min, 17 min ili 20 min). Za svaki blok vrijednosti dobivene funkcijom autokorelacije

integrirane su kako bi se dobila odgovarajuća vrijednost vremenske skale turbulencije. Množenjem dobivene vrijednosti odgovarajućom usrednjenom vrijednosti brzine vjetra dobivaju se vrijednosti integralne duljinske skale turbulencije. Sažeti prikaz statističkih podataka za različite periode usrednjavanja je dan u Tablicama 23 - 26.

Tablica 23: Statistički podaci za komponente  ${}^xL_u$ ,  ${}^xL_v$  i  ${}^xL_w$  duljinske skale turbulencije na visini 10 m, 22 m i 40 m za period usrednjavanja 5 min za ljetnu buru #16

Statistički parametar	Visina								
	10 m			22 m			40 m		
	${}^xL_u$	${}^xL_v$	${}^xL_w$	${}^xL_u$	${}^xL_v$	${}^xL_w$	${}^xL_u$	${}^xL_v$	${}^xL_w$
<b>Medijan [m]</b>	97	61	29	124	97	51	165	143	78
<b>Aritmetička sredina [m]</b>	97	66	30	125	105	55	159	143	82
<b>Minimalna vrijednost [m]</b>	28	21	8	28	20	16	32	34	21
<b>Maksimalna vrijednost [m]</b>	222	168	77	272	243	163	308	306	192
<b>Standardna devijacija [m]</b>	34	24	10	45	43	21	56	53	27

Tablica 24: Statistički podaci za komponente  ${}^xL_u$ ,  ${}^xL_v$  i  ${}^xL_w$  duljinske skale turbulencije na visini 10 m, 22 m i 40 m za period usrednjavanja 8 min za ljetnu buru #16

Statistički parametar	Visina								
	10 m			22 m			40 m		
	${}^xL_u$	${}^xL_v$	${}^xL_w$	${}^xL_u$	${}^xL_v$	${}^xL_w$	${}^xL_u$	${}^xL_v$	${}^xL_w$
<b>Medijan [m]</b>	103	65	30	134	105	53	176	156	82
<b>Aritmetička sredina [m]</b>	103	70	31	132	112	58	166	152	85
<b>Minimalna vrijednost [m]</b>	35	26	10	41	28	20	42	39	27
<b>Maksimalna vrijednost [m]</b>	215	164	73	264	245	154	302	306	190
<b>Standardna devijacija [m]</b>	34	23	9	45	44	20	57	55	26

I kod integralnih duljinskih mjera turbulencije vrijednosti medijana i aritmetičke sredine približno su jednake za različite periode usrednjavanja. Vrijednosti medijana za komponentu  ${}^xL_u$ , u rasponu su od 97 m do 113 m na visini 10 m, od 124 m do 145 m na 22 m, i od 165 m do 184 m na 40 m. Vrijednosti medijana za  ${}^xL_v$  su u rasponu od 61 m do 71 m na visini 10 m, od 9 m do 115 m na 22 m, i od 143 m do 169 m na 40 m. Vrijednosti medijana komponente  ${}^xL_w$  u rasponu su od 29 m do 32 m na najnižem nivou, od 51 m do 56 m na usrednjenom nivou, i od 78 m do 88 m na najvišem nivou. Standardna devijacija integralnih duljinskih mjera turbulencije reda veličine 30% ukazuje na umjerenu disperziju analiziranih podataka.

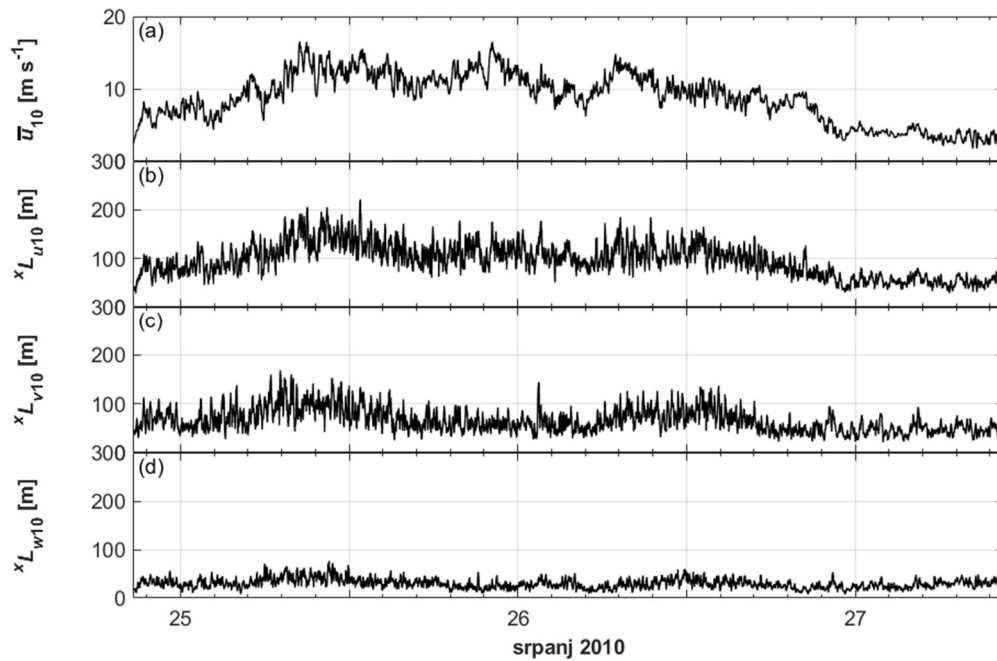
Tablica 25: Statistički podaci za komponente  $^xL_u$ ,  $^xL_v$  i  $^xL_w$  duljinske skale turbulencije na visini 10 m, 22 m i 40 m za period usrednjavanja 17 min za ljetnu buru #16

Statistički parametar	Visina								
	10 m			22 m			40 m		
	$^xL_u$	$^xL_v$	$^xL_w$	$^xL_u$	$^xL_v$	$^xL_w$	$^xL_u$	$^xL_v$	$^xL_w$
<b>Medijan [m]</b>	112	70	32	143	114	55	183	166	87
<b>Aritmetička sredina [m]</b>	109	75	32	141	120	60	174	161	88
<b>Minimalna vrijednost [m]</b>	39	35	12	47	45	25	48	50	34
<b>Maksimalna vrijednost [m]</b>	192	146	61	246	240	141	295	280	175
<b>Standardna devijacija [m]</b>	34	22	8	46	43	18	57	55	25cclo

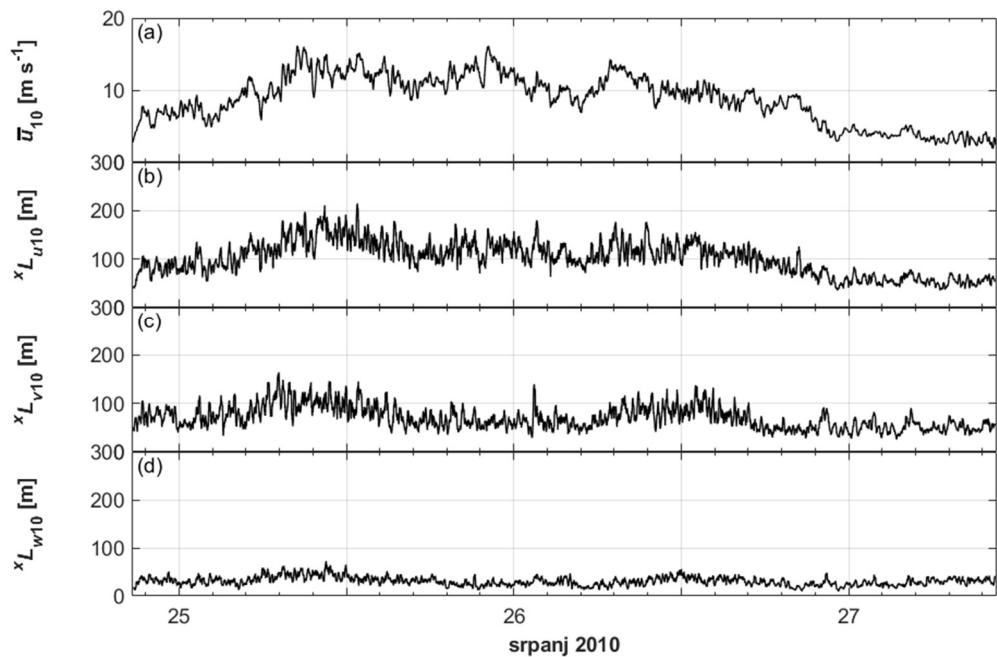
Tablica 26: Statistički podaci za komponente  $^xL_u$ ,  $^xL_v$  i  $^xL_w$  duljinske skale turbulencije na visini 10 m, 22 m i 40 m za period usrednjavanja 20 min za ljetnu buru #16

Statistički parametar	Visina								
	10 m			22 m			40 m		
	$^xL_u$	$^xL_v$	$^xL_w$	$^xL_u$	$^xL_v$	$^xL_w$	$^xL_u$	$^xL_v$	$^xL_w$
<b>Medijan [m]</b>	113	71	32	145	115	56	184	169	88
<b>Aritmetička sredina [m]</b>	110	76	32	142	121	60	176	163	89
<b>Minimalna vrijednost [m]</b>	43	36	13	50	48	26	51	52	37
<b>Maksimalna vrijednost [m]</b>	193	146	59	251	244	135	297	281	173
<b>Standardna devijacija [m]</b>	34	22	8	46	43	18	57	55	24

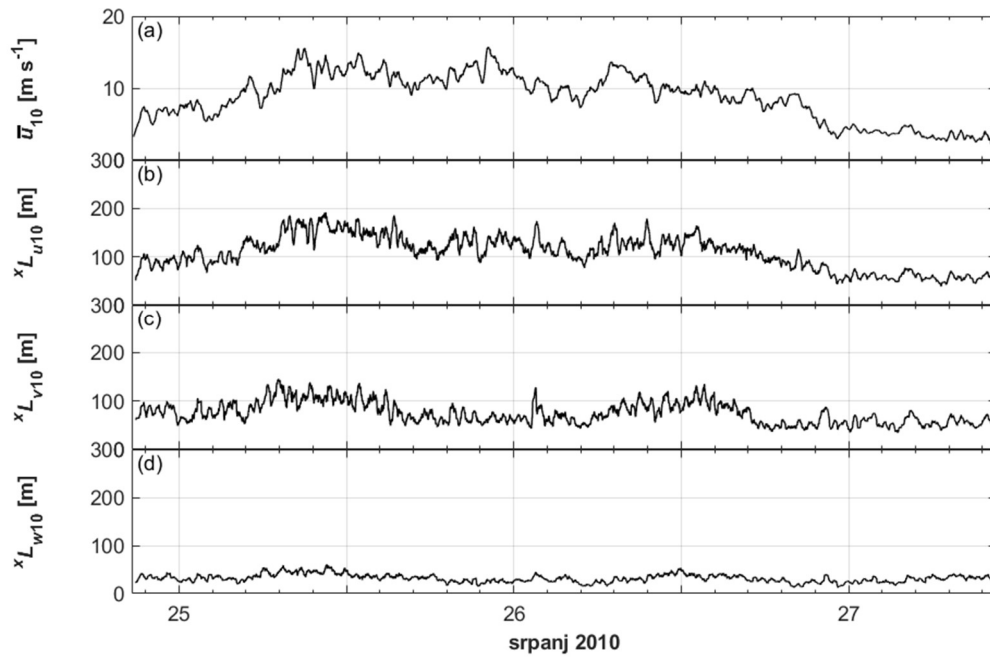
U svrhu istraživanja ovisnost integralnih duljinskih mjera turbulencije o usrednjenoj brzini vjetra na Slikama 66 - 77 prikazan je vremenski niz triju komponenti integralnih duljinskih mjera turbulencije pri periodu usrednjavanja 5 min, 8 min, 17 min i 20 min. Iz prikazanog se može zaključiti da su za sve periode usrednjavanja prisutni jednaki trendovi.



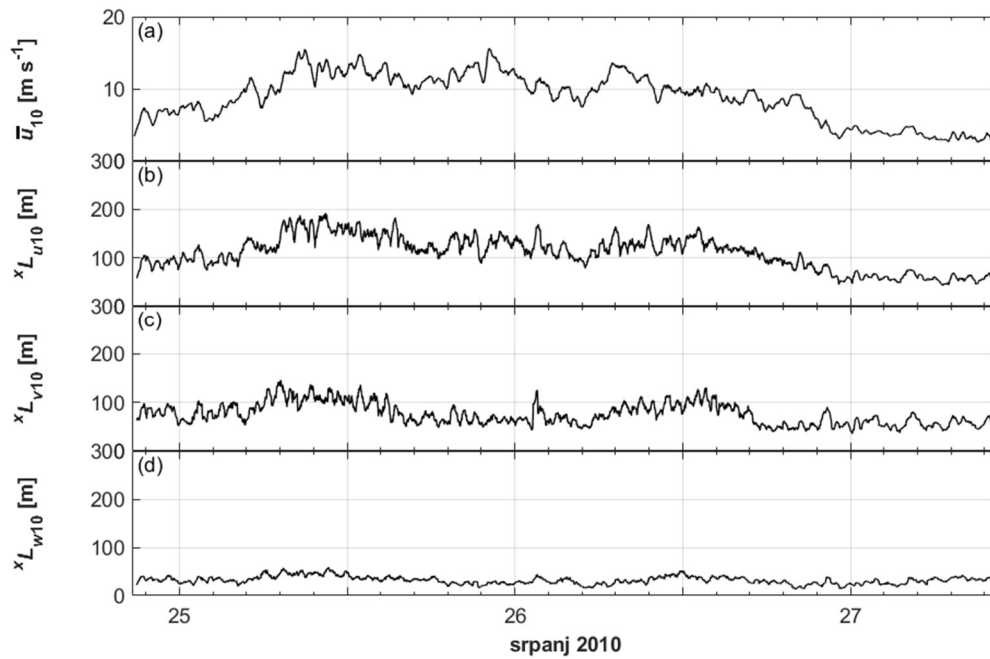
Slika 66: (a) Klizno usrednjena brzina vjeta u  $x$ -smjeru s periodom usrednjavanja 5 min na visini 10 m; vremenski niz komponenti integralnih duljinskih mjera turbulencije (b)  ${}^xL_u$ , (c)  ${}^xL_v$  i (d)  ${}^xL_w$  pri periodu usrednjavanja 5 min.



Slika 67: Isto kao Slika 66, ali za period usrednjavanja 8 min.

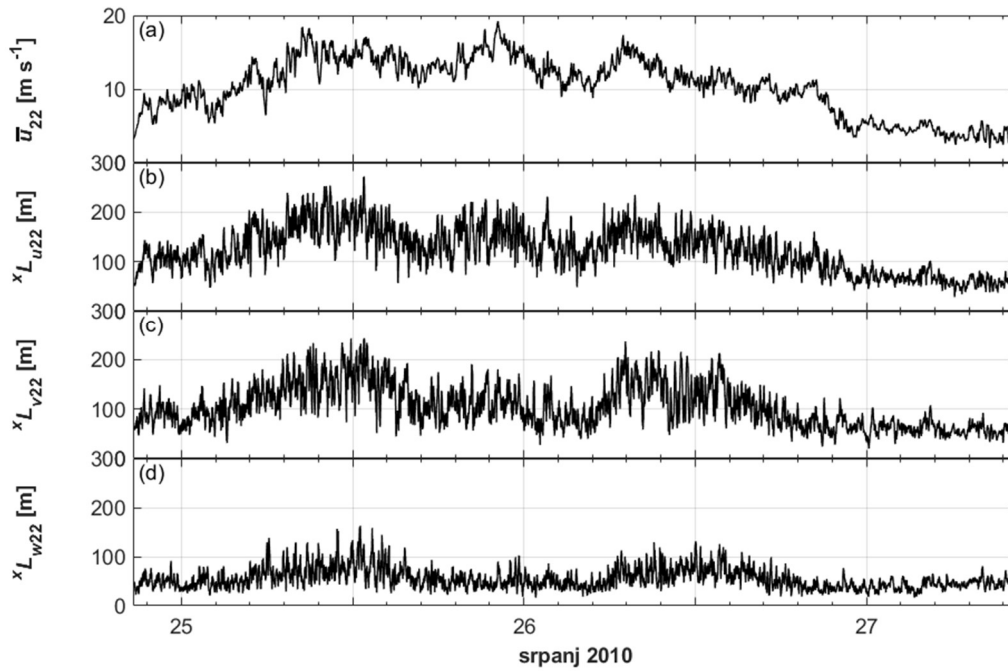


Slika 68: Isto kao Slika 66, ali za period usrednjavanja 17 min.

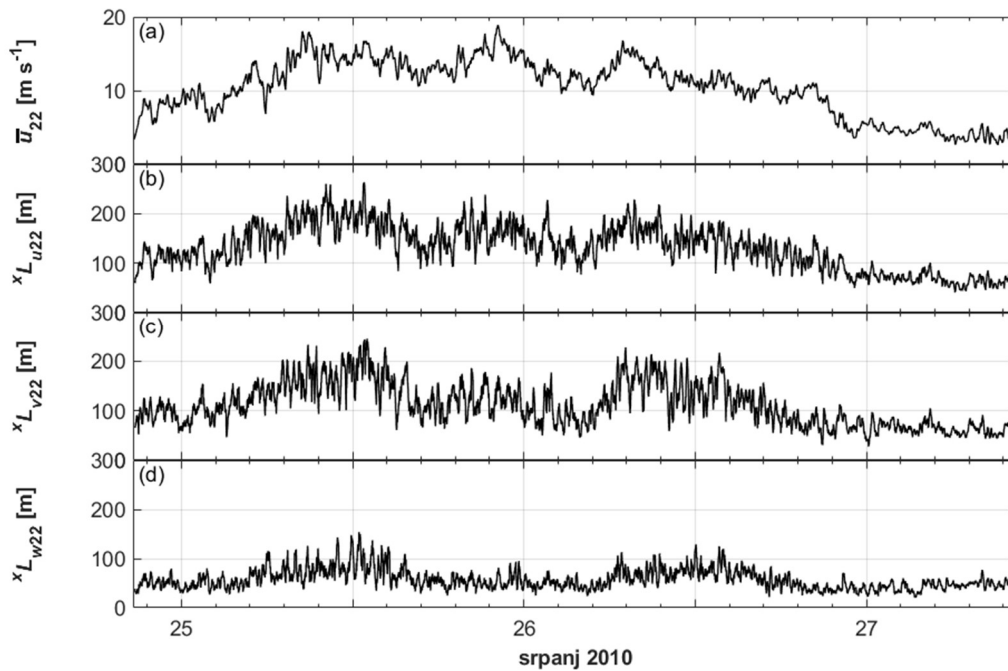


Slika 69: Isto kao Slika 66, ali za period usrednjavanja 20 min.

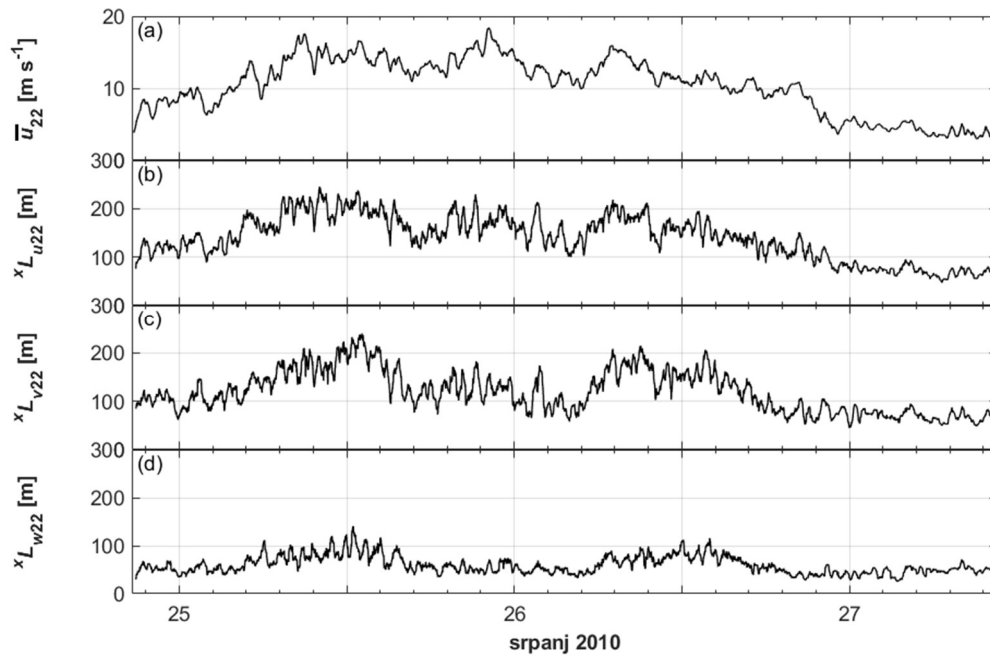




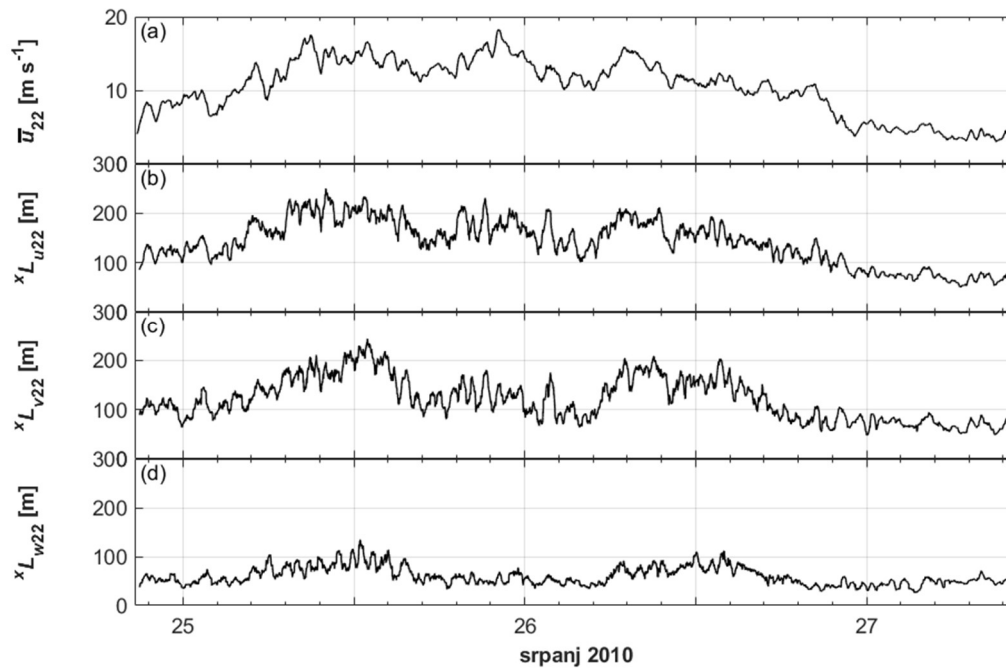
Slika 70: (a) Klizno usrednjena brzina vjeta u  $x$ -smjeru s periodom usrednjavanja 5 min na visini 22 m; vremenski niz komponenti integralnih duljinskih mjera turbulencije (b)  ${}^xL_u$ , (c)  ${}^xL_v$  i (d)  ${}^xL_w$  pri periodu usrednjavanja 5 min.



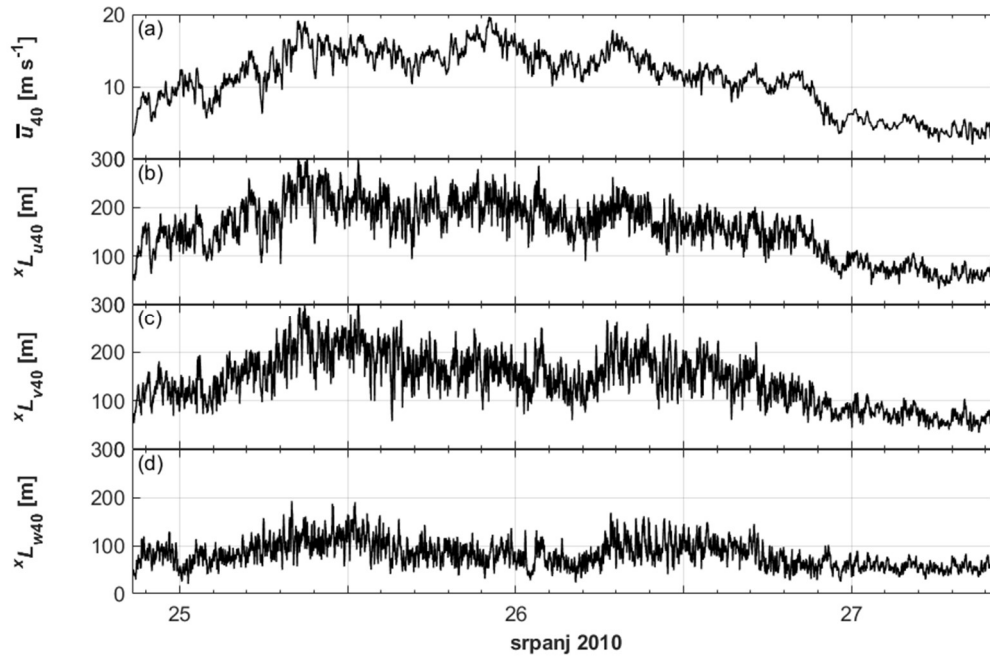
Slika 71: Isto kao Slika 70, ali za period usrednjavanja 8 min.



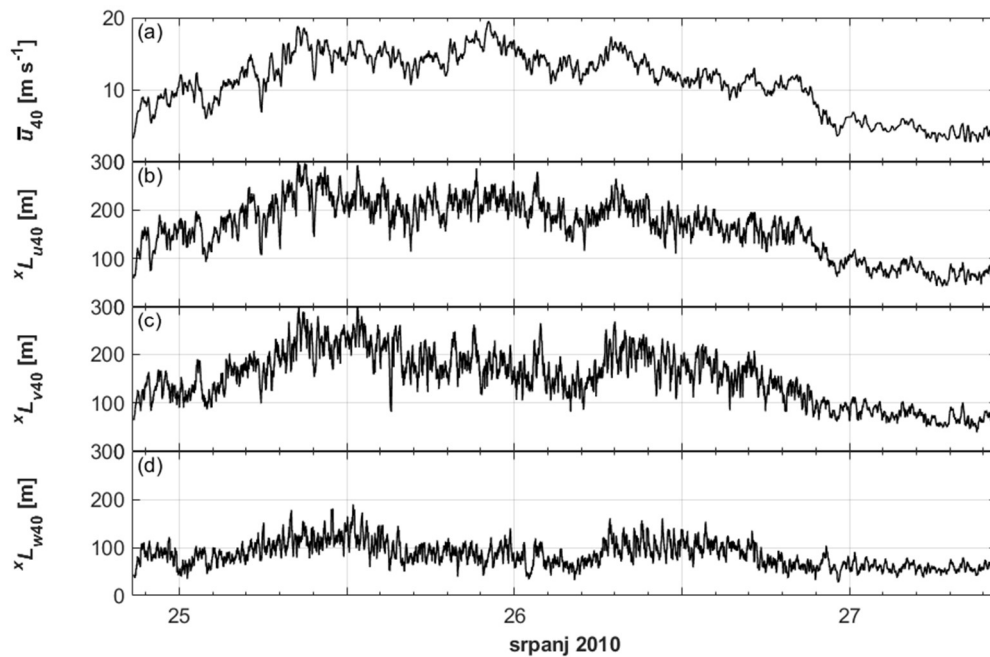
Slika 72: Isto kao Slika 70, ali za period usrednjavanja 17 min.



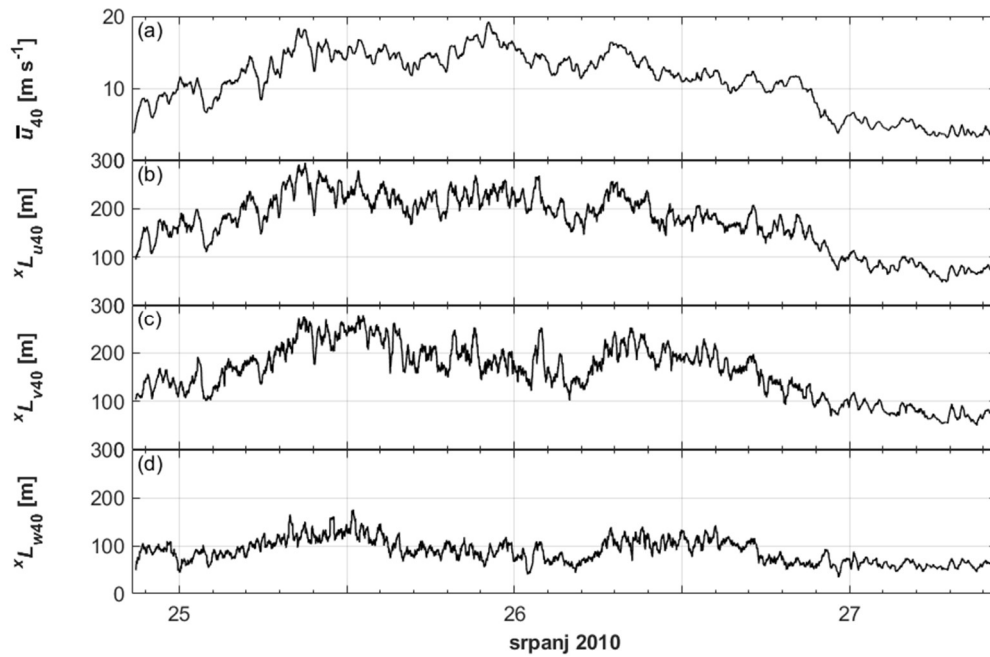
Slika 73: Isto kao Slika 70, ali za period usrednjavanja 20 min.



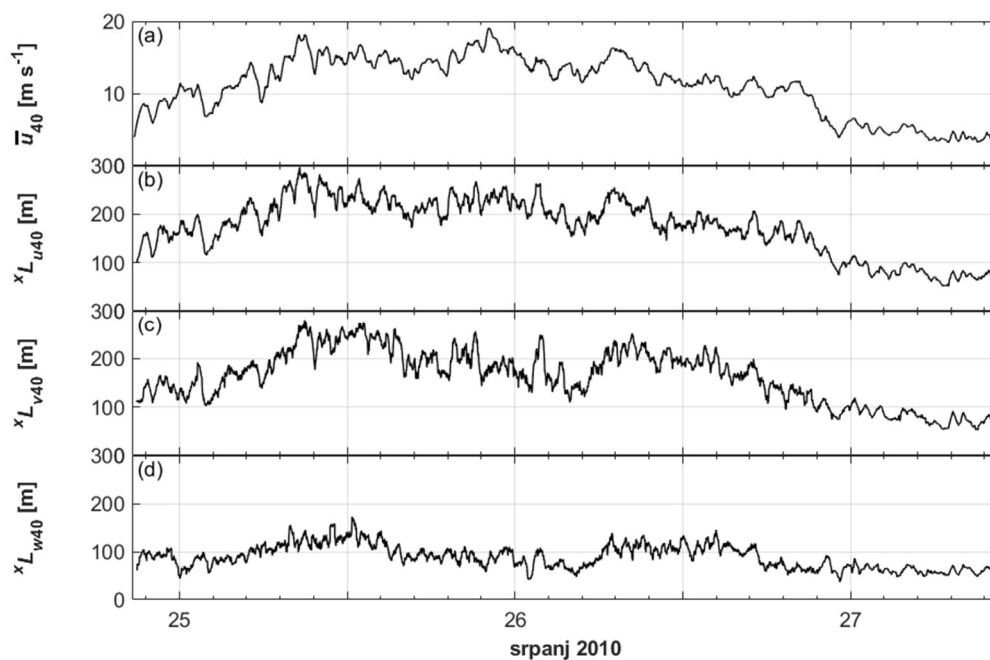
Slika 74: (a) Klizno usrednjena brzina vjeta u  $x$ -smjeru s periodom usrednjavanja 5 min na visini 40 m; vremenski niz komponenti integralnih duljinskih mjera turbulencije (b)  ${}^xL_u$ , (c)  ${}^xL_v$  i (d)  ${}^xL_w$  pri periodu usrednjavanja 5 min.



Slika 75: Isto kao Slika 74, ali za period usrednjavanja 8 min.



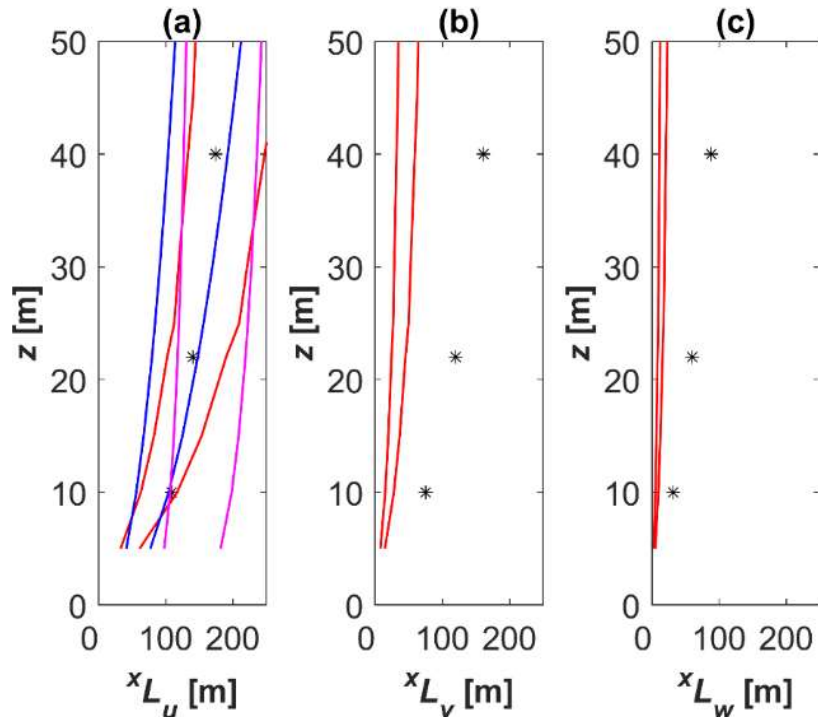
Slika 76: Isto kao Slika 74, ali za period usrednjavanja 17 min.



Slika 77: Isto kao Slika 74, ali za period usrednjavanja 20 min.

Vremenski nizovi  $x^{L_u}$ ,  $x^{L_v}$  i  $x^{L_w}$  prikazani Slikama 66 - 77 potvrđuju statističke podatke iz Tablica 23 - 26. Vrijednosti  $x^{L_u}$ ,  $x^{L_v}$  i  $x^{L_w}$  rastu s porastom usrednjene vrijednosti brzine vjetra i obrnuto. Nema jasnih trendova u odnosu na izmjenu dana i noći (Lepri i sur., 2015).

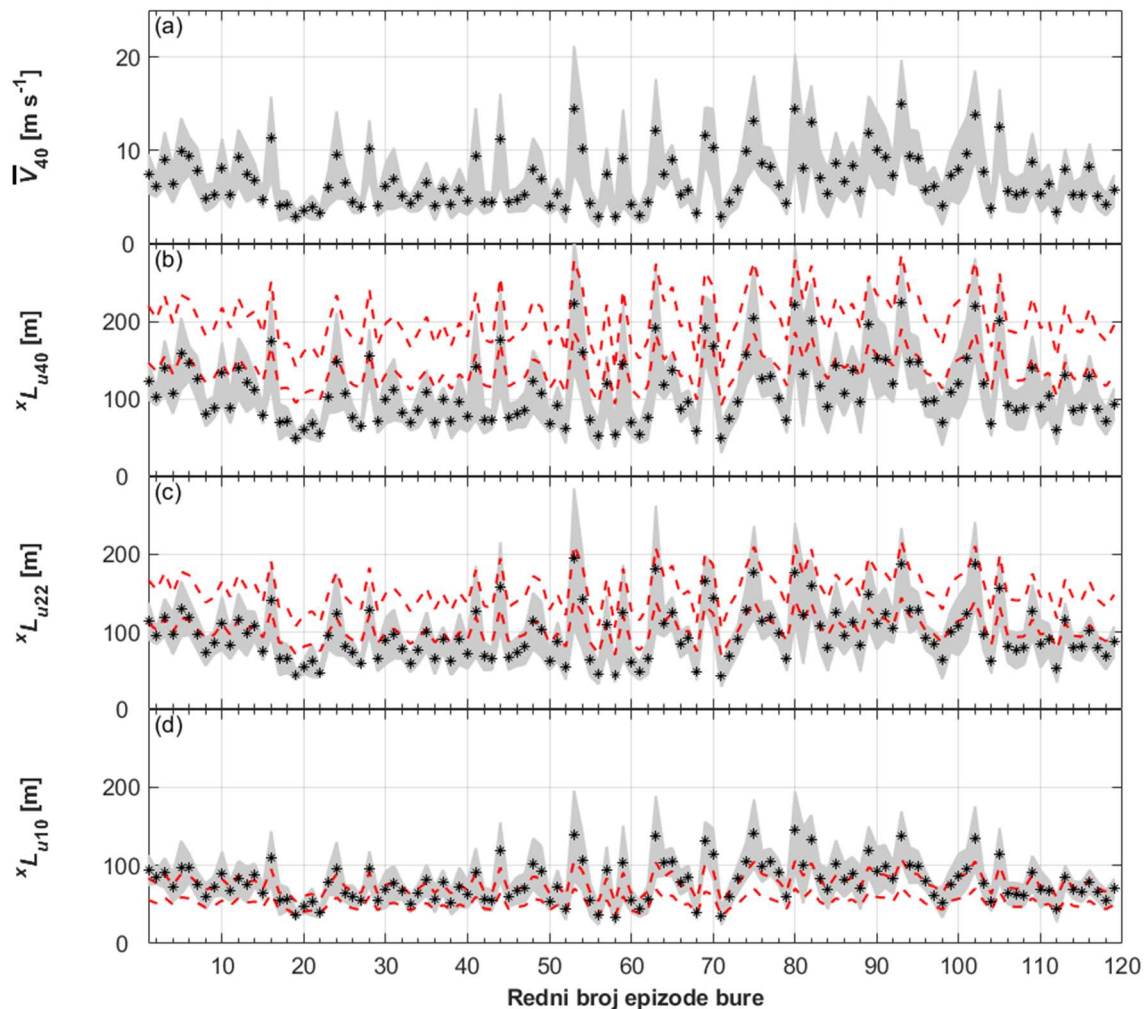
Za analizu vertikalnih varijacija integralnih duljinskih mjera turbulencije na Slici 78 prikazani su vertikalni profili promatranih parametara za period usrednjavanja 17 min. Vertikalni profili za preostala tri perioda usrednjavanja nisu prikazani jer su trendovi jednaki rezultatima prikazanim na Slici 78.



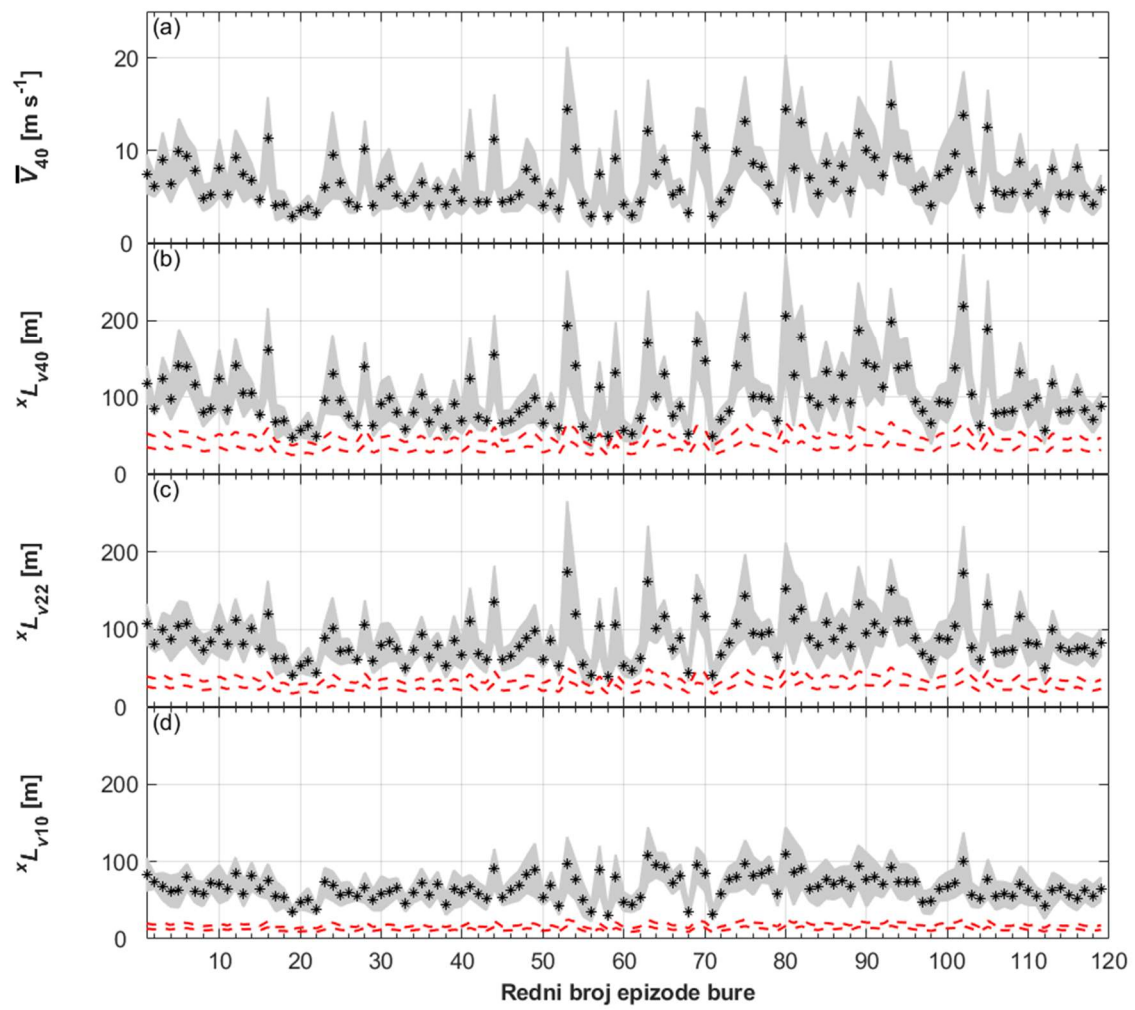
Slika 78: Vertikalni profili integralnih duljinskih mjera turbulencije (a)  ${}^xL_u$ , (b)  ${}^xL_v$  i (c)  ${}^xL_w$  za period usrednjavanja 17 min usrednjeni kroz cijeli vremenski zapis i uspoređeni s vrijednostima u međunarodnim standardima s rasponom tolerancije  $\pm 30\%$ . Legenda: zvjezdica - izračunate integralne duljinske mjere turbulencije, crvena krivulja - ESDU 85020 (1985) za  $z_0=0,03$  m, plava krivulja - HRN EN 1991 Eurocode 1 (2005), ljubičasta krivulja - ASCE 7-05 (2006).

Vrijednosti prikazane u obliku zvjezdice na Slici 78 predstavljaju usrednjene vrijednosti računane kroz cijeli vremenski zapis, što znači da jedna vrijednost na svakoj visini predstavlja cijeli zapis mjerenja na toj visini. Može se primijetiti da za ovu epizodu bure integralne duljinske skale turbulencije rastu s povećanjem visine, što je u skladu s atmosferskom fizikom (npr., Stull, 1988), i prethodnim radovima (npr., Večenaj i sur., 2010, 2011). U usporedbi s međunarodnim normama može se primijetiti da se komponenta  ${}^xL_u$  dobro podudara s ASCE 7-05 (2006), HRN EN 1991 Eurocode 1 (2005) i ESDU 85020 (1985). Ostale dvije promatrane komponente  ${}^xL_v$  i  ${}^xL_w$  značajno su veće od vrijednosti koje su preporučene u ESDU 85020 (1985) za  $z_0 = 0,03$  m, što je vjerojatno posljedica odvajanja i ponovnog nalijeganja strujanja zraka od tla, pri čemu je ovaj fenomen potrebno još detaljnije istražiti u okviru budućeg rada.

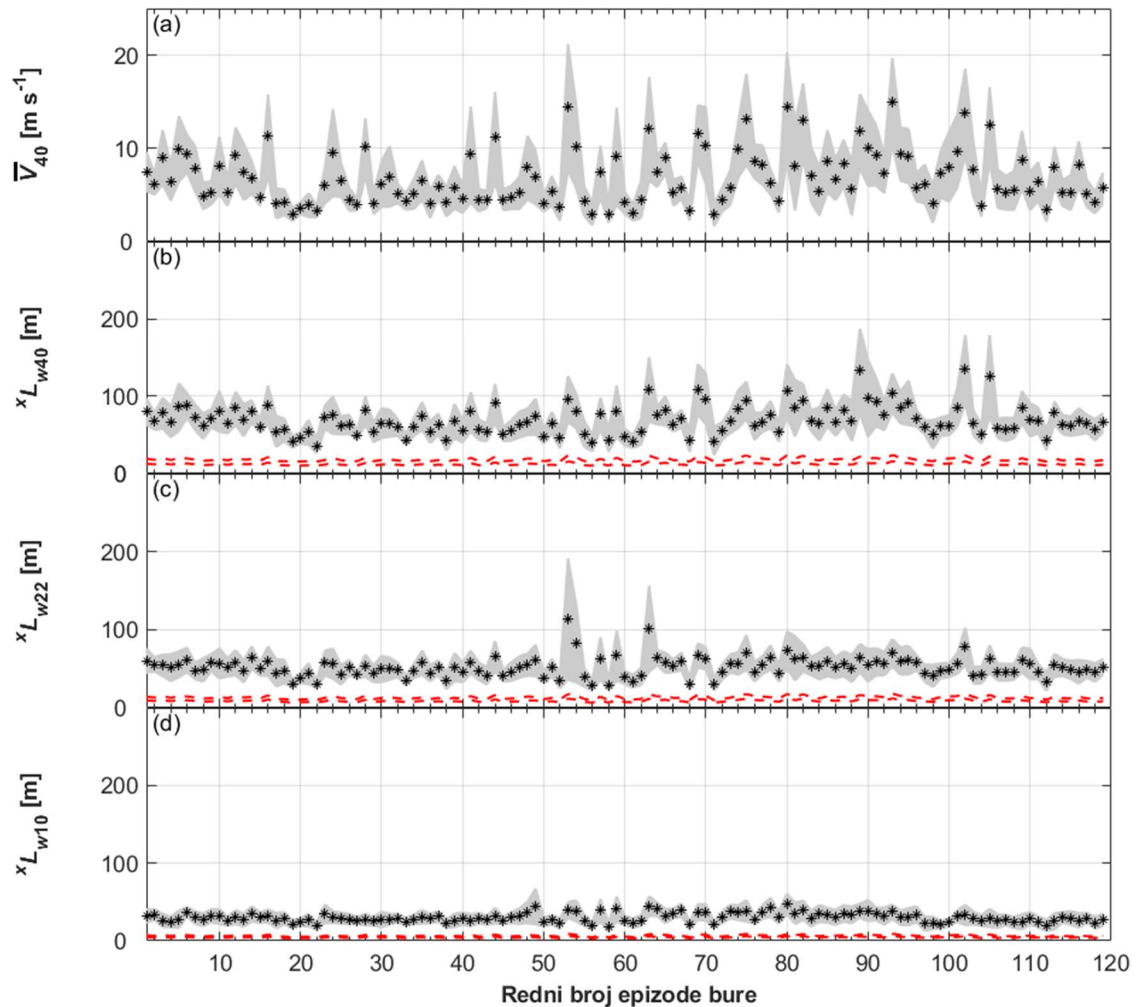
Ovi isti proračuni primijenjeni su i na preostalim 118 epizoda bure kako bi se istražila primjenjivost trendova postignutih za ljetnu buru #16 kod preostalih analiziranih epizoda bure. Budući da je na primjeru jedne epizode bure pokazano da vrijednosti integralnih duljinskih mjera turbulencije ne ovise o izboru perioda usrednjavanja, proračuni za preostale epizode bure provedeni su pri periodu usrednjavanja 17 min. Na Slikama 79 – 81 prikazane su usrednjene brzine vjetra na visini 40 m i integralnih duljinskih mjera turbulencije u  $x$ -smjeru povezanih s fluktuacijama brzine  $u'$ ,  $v'$  i  $w'$  u usporedbi s ESDU 85020 (1985) vrijednostima danim za  $z_0 = 0,03$  m.



Slika 79: (a) Usrednjena brzina vjetra na visini 40 m; integralne duljinske mjere turbulencije u  $x$ -smjeru povezane s  $u'$  na visini (b) 40 m; (c) 22 m i (d) 10 m. Legenda: crna zvjezdica - usrednjena vrijednost brzine vjetra na 40 m i pripadajuća  $^xL_u$  usrednjeni kroz cijeli vremenski zapis za svaku pojedinu epizodu bure; sivo zasjenjeno područje - standardna devijacija usrednjene brzine vjetra i  $^xL_u$  za svaku epizodu bure; crvena točkasta krivulja - vrijednosti ESDU 85020 (1985) za  $z_0 = 0,03$  m s rasponom tolerancije  $\pm 20\%$ ; vrijednosti iz standarda ESDU 85020 (1985) su računane za svaku epizodu bure zasebno.



Slika 80: Isto kao Slika 79, ali za integralne duljinske mjere turbulencije u  $x$ -smjeru povezane s  $v'$ .

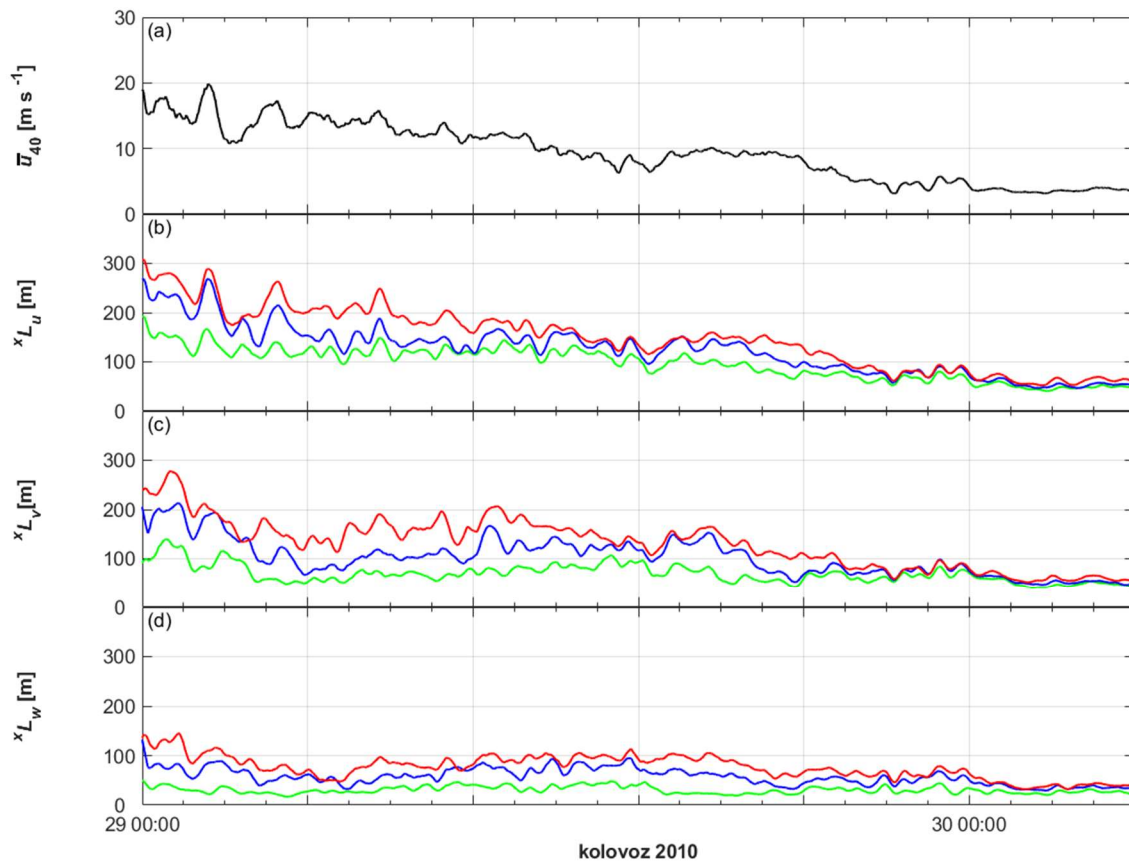


Slika 81: Isto kao Slika 79, ali za integralne duljinske mjere turbulencije u  $x$ -smjeru povezane s  $w'$ .

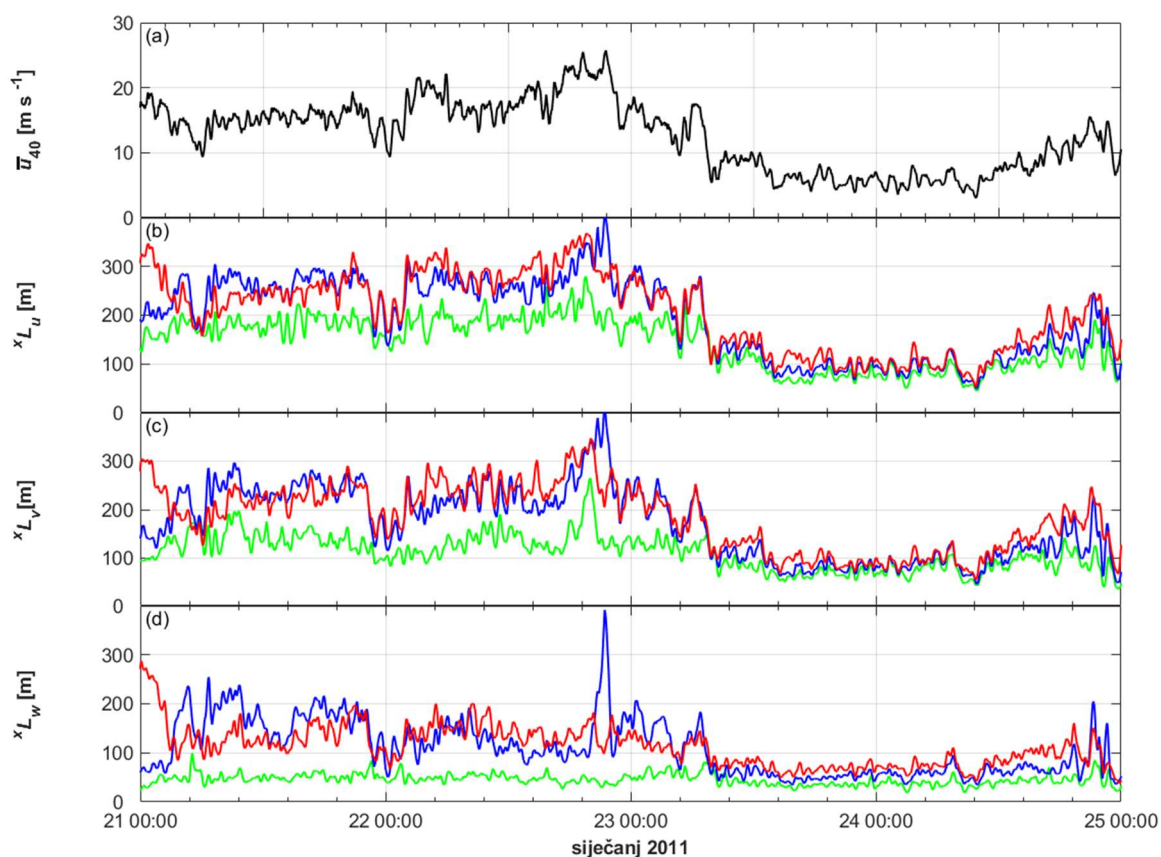
Sve tri komponente integralnih duljinskih mjera turbulencije rastu s povećanjem visine od tla, što je u skladu s atmosferskom fizikom (npr., Stull, 1988). Usrednjene vrijednosti  $xL_u$  poprimaju vrijednosti u rasponu od 50 m na visini 10 m do 100 m na visini 40 m. Vrijednosti se prilično dobro podudaraju s ESDU 85020 (1985) vrijednostima danim za  $z_0 = 0,03$  m. Podudaranje je izraženije na manjim visinama od tla, dok su dobivene vrijednosti na većim visinama manje od ESDU 85020 (1985) vrijednosti. Usrednjene vrijednosti  $xL_v$  poprimaju vrijednosti u rasponu od 50 m na visini 10 m do 100 m na visini 40 m. Dobivene vrijednosti značajno su veće od ESDU 85020 (1985) vrijednosti preporučenih za  $z_0 = 0,03$  m na sve tri visine. Usrednjene vrijednosti  $xL_w$  poprimaju vrijednosti u rasponu od 25 m na visini 10 m do 80 m na visini 40 m. Te vrijednosti su značajno veće od vrijednosti od ESDU 85020 (1985), što je vrlo vjerojatno uzrokovano različitim fenomenima strujanja zraka u AGS-u, a što je potrebno dodatno istražiti u budućim ispitivanjima.



Na Slikama 82 i 83 prikazani su vremenski nizovi usrednjene brzine vjetra i integralnih duljinskih mjera turbulencije u  $x$ -smjeru na sve tri visine na kojima su provedena mjerenja. Komponenta integralnih duljinskih mjera turbulencije  ${}^xL_u$  ima najveće vrijednosti, a komponenta  ${}^xL_w$  ima najmanje vrijednosti na sve tri visine. Maksimalne vrijednosti komponente  ${}^xL_u$  su reda veličine 300 m ljeti, a zimi i značajno iznad 300 m. Vrijednosti integralnih duljinskih mjera turbulencije veće su kod većih brzina vjetra, i obrnuto. Nije zamijećen dnevni hod analiziranih trendova (Lepri i sur., 2015).



Slika 82: Vremenski niz (a) klizno usrednjene brzine vjetra u  $x$ -smjeru s periodom usrednjavanja 17 min na visini 40 m; (b)  ${}^xL_u$ ; (c)  ${}^xL_v$ ; (d)  ${}^xL_w$ . Legenda: zelena krivulja – integralne duljinske mjere turbulencije na visini 10 m, plava krivulja – integralne duljinske mjere turbulencije na visini 22 m, crvena krivulja – integralne duljinske mjere turbulencije na visini 40 m za ljetnu epizodu bure #24.

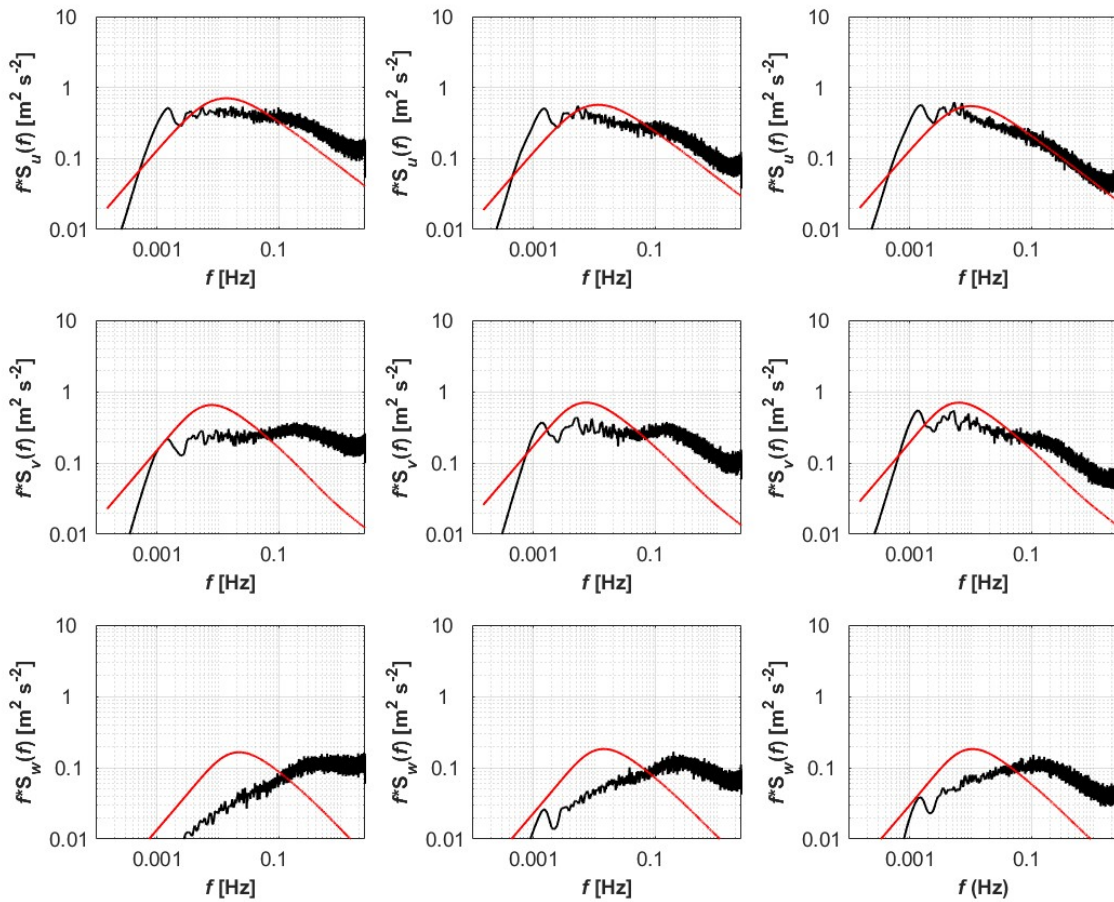


Slika 83: Isto kao Slika 82, ali za zimsku epizodu bure #63.

#### 4.6 Spektralna analiza

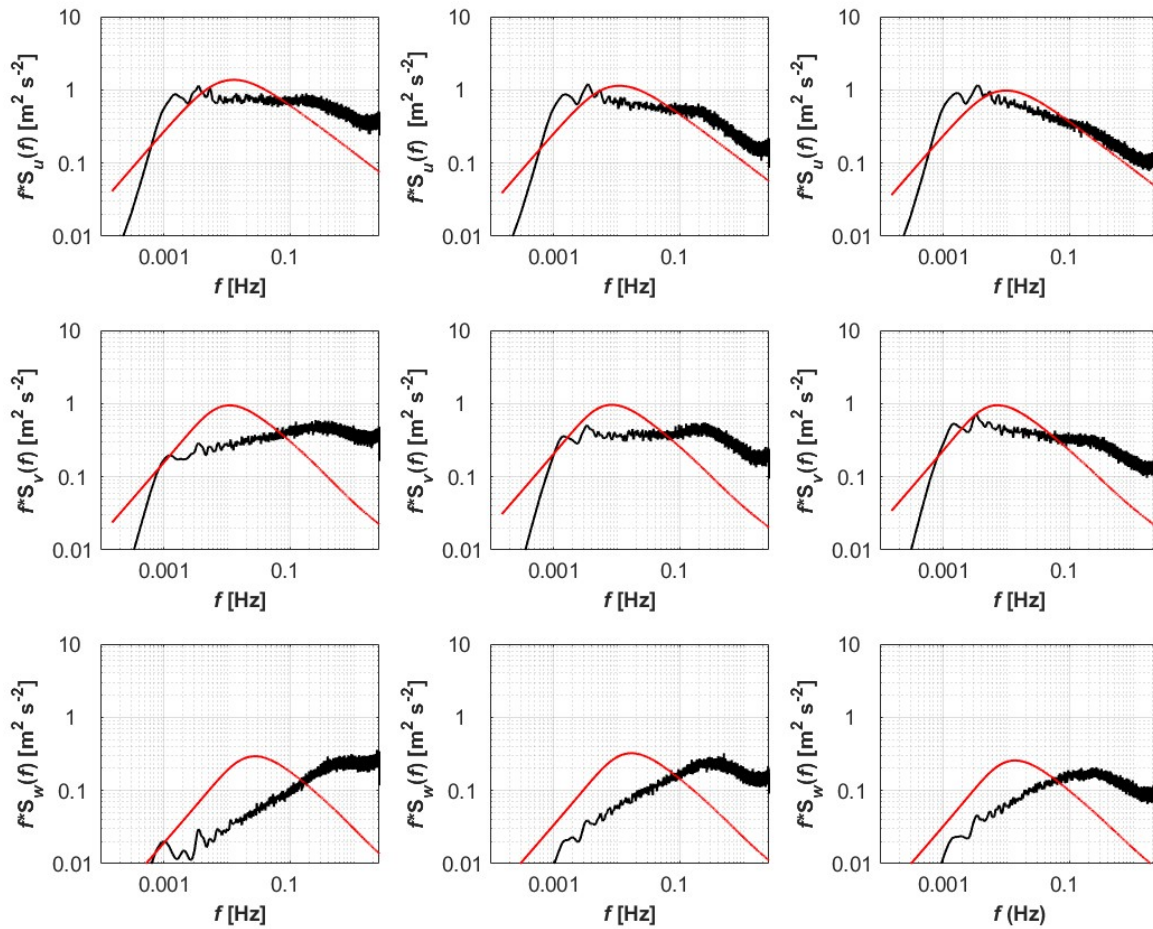
Pri proračunima djelovanja vjetra na konstrukcije iznimno je bitno poznavanje spektralnih karakteristika mahovitog vjetra. Na Slikama 84 i 85 su prikazane spektralne gustoće snage fluktuacija brzine vjetra u  $x$ -,  $y$ - i  $z$ -smjeru za ljetnu epizodu bure #12 i zimsku epizodu bure #75. Rezultati mjerenja su uspoređeni s vrijednostima spektralne gustoće triju komponenti fluktuacija brzine prema von Kármánu (1948) preporučenih u ESDU 85020 (1985). Općenito se spektralna raspodjela kinetičke energije turbulencije (TKE) bure razlikuje od spektralne raspodjele preporučene za AGS u ESDU 85020 (1985). U usporedbi s klasičnim oblikom zvona, dobiveni spektri energije pokazuju netipično ponašanje. TKE bure je raspodijeljena kroz veći raspon frekvencija u odnosu na preporuke iz ESDU 85020 (1985). Spektar bure je plosnati i nema izraženu vršnu vrijednost pri višim frekvencijama. Zapažanje se odnosi na sve tri komponente brzine bure na sve tri visine (Lepri i sur., 2017). Vjerojatno je ovaj fenomen posljedica činjenice da doprinos bure turbulenciji jače utječe na manje vrtloge u odnosu na veće

vtloge, što je u budućnosti potrebno dodatno istražiti pri većim frekvencijama uzorkovanja podataka.



Slika 84: Spektar gustoće snage fluktuacija brzine uspoređena s ESDU 85020 (1985) vrijednostima.

Legenda: crna krivulja – spektar gustoće snage brzine vjetra za ljetnu epizodu bure #12, crvena krivulja – ESDU 85020 (1985) vrijednosti. Lijevo spektar gustoće snage na visini 40 m, sredina na visini 22 m i desno na visini 10 m.



Slika 85: Isto kao Slika 84, ali za zimsku epizodu bure #75.

## 5 ZAKLJUČAK

U ovom radu su provedena opsežna istraživanja značajki bure u prizemnom sloju atmosfere iznad brdovitog terena. Rad se temelji na podacima terenskih mjerenja na lokaciji Pometeno brdo kod Dugopolja u zaleđu grada Splita u razdoblju od travnja 2010. do lipnja 2011. godine. Ukupno je zabilježeno 269 pojedinačnih epizoda bure koje su trajale od nekoliko sati do pet dana. Od toga je analizirano 119 epizoda bura koje su neprekidno trajale dulje od 10 h.

Istražena je primjenjivost zakona potencije i logaritamskog zakona na izmjerene usrednjene vrijednosti brzine puhanja bure na tri različite visine. Provedena je analiza termičke stratifikacije bure, intenziteta turbulencije, Reynoldsovog smičnog naprezanja i integralnih duljinskih mjera turbulencije, kao i spektra gustoće snage fluktuacija brzine puhanja bure. Kako bi se istražilo da li su u međunarodnim normama na zadovoljavajući način dane značajke zavjetrinskih vjetrova i planinskih oluja, u koje se ubraja i bura, preporučene vrijednosti analiziranih fizikalnih veličina su uspoređene s rezultatima postignutim terenskim mjerenjima. Nadalje, posebno je značajno postojanje varijacija aerodinamičkih značajki na određenoj lokaciji za vrijeme različitih brzina vjetra jer inženjeri koji proučavaju opterećenje vjetra na konstrukcije općenito smatraju da su ta svojstva za određeno područje konstantna bez obzira na promjenjive značajke vjetra.

Preliminarni proračuni su provedeni na temelju ljetne epizode bure #16 koja je trajala ukupno 62 h u vremenskom razdoblju od 24. do 27. srpnja 2010. godine, a zatim su isti proračuni primijenjeni na preostalih 118 epizoda kako bi se istražila primjenjivost postignutih rezultata na preostale epizode bure.

Originalni doprinos ovog rada obuhvaća sljedeća saznanja:

- Zbog snažnog mehaničkog miješanja, bura je približno neutralno termički stratificirana bez značajnijih odstupanja tijekom dana (Lepri i sur., 2014, 2017). U zimskom periodu epizode bure traju dulje uz izraženije usrednjene i maksimalne vrijednosti brzine vjetra.
- Prvi puta je pokazano da se profili usrednjenih vrijednosti brzine puhanja bure u smjeru glavnog strujanja podudaraju s empiričkim zakonom potencije i logaritamskim zakonom (Lepri i sur., 2014, 2017).

- Zakon potencije i logaritamski zakon točnije aproksimiraju izmjerene podatke kada se analiza provodi korištenjem medijana umjesto aritmetičke sredine brzine vjetra zbog pomaka usrednjene vrijednosti aerodinamičke duljine hrapavosti tla tijekom mjerenja (Lepri i sur., 2014).
- Bitna značajka aerodinamičke duljine hrapavosti tla je razlika između vrijednosti postignutih proračunom aritmetičke sredine i medijana što ukazuje na činjenicu da je robusniji medijan prikladniji parametar za određivanje aerodinamičke duljine hrapavosti tla u odnosu na pripadajuću usrednjenu vrijednost (Lepri i sur., 2014).
- Aritmetička sredina brzine trenja ne ovisi o periodu usrednjavanja kao niti aritmetička sredina i medijan eksponenta zakona potencije (Lepri i sur., 2014).
- Eksponent zakona potencije i aerodinamička duljina hrapavosti tla se povećavaju, a brzina trenja se smanjuje pri smanjenju usrednjenih brzina vjetra što ukazuje na vertikalni profil brzine tipičan za ruralna područja pri većim brzinama vjetra, tj. profil tipičan za urbana područja pri manjim brzinama vjetra, pri čemu su zabilježene pojave jednake danju i noću (Lepri i sur., 2014, 2017).
- Intenzitet turbulencije i Reynoldsovo smično naprezanje nisu osjetljivi na promjenu usrednjene brzine vjetra te poprimaju približno konstantne vrijednosti kada su usrednjene vrijednosti brzine veće od  $5 \text{ m s}^{-1}$ , što ukazuje na činjenicu da se brzina od  $5 \text{ m s}^{-1}$  može smatrati kritičnom brzinom puhanja bure. Kada su usrednjene vrijednosti brzine vjetra manje od  $5 \text{ m s}^{-1}$ , vrijednosti navedenih parametara su značajno raspršenije (Lepri i sur., 2015).
- Prvi puta je proveden proračun Reynoldsovog smičnog naprezanja na temelju mjerenih podataka (Lepri i sur., 2015).
- Postignute vrijednosti intenziteta turbulencije se podudaraju s vrijednostima danim u međunarodnom standardu ESDU 85020 (1985), za razliku od Reynoldsovog smičnog naprezanja (Lepri i sur., 2015, 2017).

- Vrijednosti duljinskih mjera turbulencije rastu s porastom brzine vjetra i obrnuto (Lepri i sur., 2015, 2017).
- S porastom visine od tla, intenzitet turbulencije i apsolutne vrijednosti Reynoldsovog smičnog napreznja opadaju, a integralne duljinske mjere turbulencije rastu, što je u skladu sa značajkama standardnog AGS-a (Lepri i sur., 2015, 2017).
- Longitudinalna komponenta integralnih duljinskih mjera turbulencije se podudara s vrijednostima danim u međunarodnim standardima za odgovarajući tip terena, dok su komponente integralnih duljinskih mjera turbulencije povezane s lateralnim i vertikalnim fluktuacijama brzine bitno veće od vrijednosti preporučenih u međunarodnim standardima (Lepri i sur., 2015, 2017).
- Značajke intenziteta turbulencije, Reynoldsovog smičnog napreznja i integralnih duljinskih mjera turbulencije ne ovise o izboru perioda usrednjavanja, ne postoje bitna odstupanja tijekom dana, a usrednjene vrijednosti i medijani su približno jednaki (Lepri i sur., 2015).
- Kinetička energija turbulencije bure je raspodijeljena u većem rasponu frekvencija u odnosu na preporučene ESDU 85020 (1985) vrijednosti (Lepri i sur., 2017).
- Spektar gustoće snage fluktuacija brzine bure je plosnati, bez izrazite vršne vrijednosti, uz postojanje velike količine energije pri višim frekvencijama; pri čemu se ovi spektri bure ne podudaraju s preporukama inženjerskih standarda (Lepri i sur., 2017).

Ovo istraživanje je ograničeno na jedno geografsko područje i vrstu terena, pa je u budućnosti potrebno provesti dodatna istraživanja značajki turbulencije bure na drugim područjima, tijekom potencijalno različitih uvjeta termičke stabilnosti, godišnjih doba i za različite visine mjernih točaka, kao i raspodjelu ekstremnih vrijednosti u odnosu na različite načine nastanka bure.

## LITERATURA

Àgústsson H, Ólafsson H (2007) Simulating a severe windstorm in complex terrain. *Meteorol Z* 16(1): 111-122.

Architectural Institute of Japan (AIJ) (2006) Recommendations for loads on buildings (in English). Architectural Institute of Japan, Tokyo, Japan, 657 str.

Albertson JD, Parlange MB, Kiely G, Eichinger WE (1997) The average dissipation rate of turbulent kinetic energy in the neutral and unstable atmospheric surface layer, *J Geophys Res Atmos* 102: 13423–13432.

American Society of Civil Engineers (ASCE) (2006) Minimum design loads for buildings and other structures ASCE/SEI 7-05. Reston, Virginia, USA, 593 str.

Babić N, Večenaj Ž, Kozmar H, Horvath K, DeWekker SFJ, Grisogono B (2016) On turbulent fluxes during strong winter bora wind events. *Bound-Lay Meteorol* 158:331-350.

Bajić A (1988) The strongest bora event during ALPEX SOP. *Rasprave* 23: 1-12.

Bajić A (1989) Severe Bora on the northern Adriatic – statistical analysis. *Rasprave* 24: 1-9.

Bajić A (1991) Application of the two-layer hydraulic theory on the severe northern Adriatic bora. *Meteorol Rundsch* 44, 129-133.

Bajić A, Peroš B (2005) Meteorological basis for wind loads calculation in Croatia. *Wind Struct* 8: 389-405.

Belušić D, Klaić ZB (2004) Estimation of Bora wind gusts using a limited area model. *Tellus* 56: 296-307.

Belušić D, Pasarić M, Orlić M (2004) Quasi-periodic bora gusts related to the structure of the troposphere. *Q J Roy Meteor Soc* 130(598): 1103-1121.



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

Belušić D, Pasarić M, Pasarić Z, Orlić M, Grisogono B (2006) A note on local and non-local properties of turbulence in the bora flow. *Meteorol Z* 15(3): 301-306.

Belušić D, Žagar M, Grisogono B (2007) Numerical simulation of pulsations in the Bora wind. *Q J Roy Meteor Soc* 133(627): 1371-1388.

Belušić D, Hrastinski M, Večenaj Ž, Grisogono B (2013) Wind regimes associated with a mountain gap at the northeastern Adriatic coast. *J Appl Meteorol Clim*, 52(9): 2089-2105.

Bougeault P, Binder P, Buzzi A, Dirks R, Houze R, Kuettnner J, Smith RB, Steinacker R, Volkert H (2001) The MAP special observing period. *B Am Meteorol Soc* 82: 433-462.

Clark TL, Farley RD (1984) Severe downslope windstorm calculations in two and three spatial dimensions using anelastic interactive grid nesting: a possible mechanism for gustiness. *J Atmos Sci* 41: 329-350.

Clark TL, Hall WD, Banta RM (1994) Two- and three-dimensional simulations of the 9 January 1989 severe Boulder windstorm: comparison with observations. *J Atmos Sci* 51: 2317-2343.

Counihan J (1975) Adiabatic atmospheric boundary layers: a review and analysis of data from the period 1880 –1972. *Atmos Environ* 9: 871-905.

Čavlina Tomašević I, Cheung KKW, Vučetić V, Fox-Hughes P, Horvath K, Telišman Prtenjak M, Beggs PJ, Malečić B, Milić V (2022) The 2017 Split wildfire in Croatia: Evolution and the role of meteorological conditions. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss.* 22: 3143–3165. <https://doi.org/10.5194/nhess-2022-116>.

Durrán DR (1986) Another look at downslope windstorms. Part I: The development of analogs to supercritical flow in an infinitely deep, continuously stratified fluid. *J Atmos Sci* 43: 2527–2543.

Dyrbye C, Hansen S (1997) *Wind Loads on Structures*. Wiley, New York, NY, USA, 226 str.

Egger J (1990) Thermally Forced Flows: Theory. U: Blumen, W. (eds) *Atmospheric Processes over Complex Terrain*. Meteorological Monographs, vol 23. American Meteorological Society, Boston, MA, 43:59.

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

ESDU Data Item No. 74030 (1976) Characteristics of atmospheric turbulence near the ground. Part I: definitions and general information. Engineering Science Data Unit, London, UK, 19 str.

ESDU Data Item No. 85020 (1985) Characteristics of atmospheric turbulence near the ground. Part II: single point data for strong winds (neutral atmosphere). Engineering Science Data Unit, London, UK.

ESDU Data Item No. 86010 (1986) Characteristics of atmospheric turbulence near the ground, Part III: Variations in space and time for strong winds (neutral atmosphere). Engineering Sciences Data Unit, London, UK.

Gohm A, Mayr GJ (2005) Numerical and observational case study of a deep Adriatic bora. *Q J Roy Meteor Soc* 131:1363-1392.

Gohm A, Mayr GJ, Fix A, Giez A (2008) On the onset of Bora and the formation of rotors and jumps near a mountain gap. *Q J Roy Meteor Soc* 134: 21–46.

Golem P, Toman I, Večenaj Ž, Kozmar H, Grisogono B (2022) Unique Windward Measurements and a Mesoscale Simulation of an Extremely Long-Lasting Severe Bora Event. *Bound-Lay Meteorol* 183:495-504. doi:10.1007/s10546-022-00689-7

Grisogono B, Oerlemans J (2001) Katabatic flow: analytic solution for gradually varying eddy diffusivities. *J Atmos Sci* 58: 3349–3354.

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

Grisogono B (2011) The angle of the near-surface wind-turning in weakly stable boundary layers. *Q J Roy Meteor Soc* 137(656): 700-708.

Grisogono B, T Jurlina, Ž Večenaj, I. Güttler, (2015) Weakly nonlinear Prandtl model for simple slope flows. *Q J Roy Meteor Soc* 141: 883-892.

Grubišić V (2004) Bora-driven potential vorticity banners over the Adriatic. *Q J Roy Meteor Soc* 130: 2571–2603.

Heimann D (2001) A model-based wind climatology of the eastern Adriatic coast. *Meteorol Z* 10(1): 5-16.

Hellman G (1916) Über die Bewegung der Luft in den untersten Schichten der Atmosphäre. *Meteorol Z* 34: 273-285.

Holmes JD (2007) *Wind Loading of Structures*. 2nd Ed., Taylor & Francis, London, UK, 433 str.

Horvath K, Ivančan-Picek B (2009) A numerical analysis of a deep Mediterranean lee cyclone: Sensitivity to mesoscale potential vorticity anomalies. *Meteor Atmos Phys*, 113: 161–171.

Horvath K, Ivatek-Šahdan S, Ivančan-Picek B, Grubišić V (2009) Evolution and structure of severe cyclonic Bora: contrast between the northern and southern Adriatic. *Weather Forecast* 24: 946-964.

Horvath K, Bajić A, Ivatek-Šahdan S (2011) Dynamical Downscaling of Wind Speed in Complex Terrain Prone To Bora-Type Flows. *J Appl Meteorol Climatol* 50(8): 1676-1691.

Högström U (1988) Non-dimensional wind and temperature profiles in the atmospheric surface layer, a re-evaluation. *Bound - Lay Meteorol* 42: 55-78.

HRN EN 1991 Eurokod 1: Djelovanja na konstrukcije - Dio 1-4: Opća djelovanja - Djelovanja vjetra (EN 1991-1-4:2005+AC:2010+A1:2010). Hrvatski zavod za norme, Zagreb, Hrvatska, 142 str.

Ivančan-Picek B, Vučetić V (1990) Bora on the northern Adriatic coast during the ALPEX-SOP 20-25 March 1982. *Rasprave* 25:1-12.

Ivančan-Picek B, Tutiš V (1996) A case study of a severe Adriatic bora on 28 December 1992. *Tellus* 48A: 357-367.

ISO 4354 (1997) Wind actions on structures. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 48 str.

Jackson PL, Mayr G, Vosper S (2013) Dynamically-Driven Winds. U: Chow FK, De Wekker SFJ, Snyder BJ (eds.) *Mountain Weather Research and Forecasting. Recent Progress and Current Challenges*. Springer, Dordrecht, the Netherlands, 121-218.

Jurčec V (1981) On mesoscale characteristics of Bora conditions in Yugoslavia. *Pure Appl Geophys* 119: 640-657.

Jurčec V (1988) The Adriatic frontal bora type. *Rasprave* 23: 13-25.

Jurčec V (1989) Severe Adriatic Bora storms in relation to synoptic developments. *Rasprave* 24: 11-20.

Jurčec V, Visković S (1994) Mesoscale characteristics of southern Adriatic Bora storms. *Geofizika* 11(1): 33-46.

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

Klaić ZB, Prodanov A, Belušić, D (2009) Wind measurements in Senj – underestimation of true bora flows. *Geofizika* 26: 245-252.

Klemp JB, Durran DR (1987) Numerical modelling of Bora winds. *Meteorol Atmos Phys* 36(1-4): 215-227.

Kozmar H, (2010) Scale effects in wind tunnel modeling of an urban atmospheric boundary layer. *Theor Appl Climatol* 100: 153–162.

Kozmar H, Butler K, Kareem A (2012a) Transient cross-wind aerodynamic loads on a generic vehicle due to bora gusts. *J Wind Eng Ind Aerod* 111: 73-84.

Kozmar H, Procino L, Borsani A, Bartoli G (2012b) Sheltering efficiency of wind barriers on bridges. *J Wind Eng Ind Aerod* 107-108: 274-284.

Kozmar H, Procino L, Borsani A, Bartoli G (2014) Optimizing height and porosity of roadway wind barriers for viaducts and bridges. *Eng Struct* 81: 49–61.

Kozmar H, Butler K, Kareem A (2015) Downslope gusty wind loading of vehicles on bridges. *J Bridge Eng* 20 (11): 04015008-1, ISSN 1084-0702.

Kozmar H, Grisogono B (2020) Characteristics of Downslope Wind Storms in the View of the Typical Atmospheric Boundary Layer. U: Horia H, Kareem A (eds.) *The Oxford Handbook of Non-Synoptic Wind Storms*. Oxford University Press, Oxford, UK, 83-114.

Kuettner J, O'Neill THR (1981) ALPEX. The GARP mountain subprogram. *B Am Meteorol Soc* 67: 793-805.

Kuzmić M, Grisogono B, Li X, Lehner S (2015) Examining deep and shallow Adriatic bora events. *Q J Roy Meteor Soc* 141: 3434–3438.

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

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

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

Likso T, Pandžić K (2011) Determination of surface layer parameters at the edge of a suburban area. *Theor Appl Climatol* 108(3-4): 373-384.

Lilly D K (1978) A severe downslope windstorm and aircraft turbulence event induced by a mountain wave. *J Atmos Sci* 35: 59–77.

Lukšić I (1975) Bura u Senju. *Senjski zbornik* 6: 467-494.

Magjarević V, Večenaj Ž, Horvath K, Grisogono B (2011) Turbulence averaging interval for summer Bora flows at the middle of the NE Adriatic coast. *Proceedings of the 31st International Conference on Alpine Meteorology, Aviemore, Scotland, 23 23-27 May 2011. (Poster).*

Makjanić B (1970) On the diurnal variation of the bora wind speed. *Rad JAZU* 349: 33-92.

Makjanić B (1978) Bura, jugo, etezija. *Prilozi poznavanju vremena i klime u SFRJ* 5: 1-43.

Mahrt L, Gamage N (1987) Observations of turbulence in stratified flow. *J Atmos Sci* 44: 1106-1121.

Mayr GJ, Plavcan D, Armi L, Elvidge A, Grisogono B, Horvath K, Jackson P, Neururer A, Seibert P, Steenburgh JW, Stiperski I, Sturman A, Večenaj Ž, Vergeiner J, Vosper S, Zängl G (2018) The Community Foehn Classification Experiment. *Bull Am Meteorol Soc*, 99(11): 2229–2235.

Neiman PJ, Hardesty RM, Shapiro MA, Cupp RE (1988) Doppler lidar observations of a downslope windstorm. *Mon Weather Rev*, 116(11): 2265-2275.

Pandžić K (2002) *Analiza meteoroloških polja i sustava*. HINUS, Zagreb, Hrvatska, 315 str.

Peltier WR, Scinocca JF (1990) The origin of severe downslope windstorm pulsations. *J Atmos Sci* 56: 2853-2870.

Petkovšek Z (1976) Periodicity of Bora gusts. *Rasprave-Papers* 20: 67-75.

Petkovšek Z (1982) Gravity waves and Bora gusts, *Ann Meteor* 19: 108-110.

Petkovšek Z (1984) Some characteristics of bora gusts. *Zbornik meteoroloških i hidroloških radova* 10: 119-122.

Petkovšek Z (1987) Main Bora gusts - a model explanation. *Geofizika* 4: 41-50.

Poje D (1992) Wind persistence in Croatia. *Int J Climatol* 12: 569-586.

Rakovec J (1987) Preliminary report on spectral characteristics of Bora on the island of Rab. *Geofizika* 4: 35-40.

Raupach MR, Finnigan J J, Brunei Y (1989) Coherent eddies in vegetation canopies. Fourth Australasian Conference on Heat and Mass Transfer. Christchurch, New Zealand, 75-90.

Serafin S, Adler B, Cuxart J, De Wekker SFJ, Gohm A, Grisogono B, Kalthoff N, Kirshbaum DJ, Rotach MW, Schmidli J, Stiperski I, Večenaj Ž, Zardi D (2018) Exchange

Processes in the Atmospheric Boundary Layer Over Mountainous Terrain. *Atmosphere*, 9(3): 102, 32. doi: <https://doi.org/10.3390/atmos9030102>

Simiu E, Scanlan RH (1996) *Wind effects on structures*. John Wiley, New York, NY, USA, 704 str.

Smith RB (1985) On severe downslope winds. *J Atmos Sci* 42: 2597–2603.

Smith RB (1987) Aerial observations of Yugoslavian Bora. *J Atmos Sci* 44(2): 269-297.

Smith RB, Sun J (1987) Generalized hydraulic solutions pertaining to severe downslope winds. *J Atmos Sci* 44, 2934–2939.

Solari G, Burlando M, De Gaetano P, Repetto MP (2015) Characteristics of thunderstorms relevant to the wind loading of structures. *Wind Struct* 20 (6): 763-791.

Stull RB (1988) *An introduction to boundary layer meteorology*. Kluwer, Dordrecht, Netherlands, 670 str.

Šoljan V, Belušić A, Šarović K, Nimac I, Brzaj S, Suhin J, Belavić M, Večenaj Ž, Grisogono B (2018) Micro-Scale Properties of Different Bora Types, *Atmosphere* 9: 116, 25. doi:10.3390/atmos9040116

Telišman Prtenjak M, Belušić D (2009) Formation of reversed lee flow over the northeastern Adriatic during Bora. *Geofizika* 26: 145-155.

Thuillier RH, Lappe UO (1964) Wind and temperature profile characteristics from observations on a 1400 ft tower. *J Appl Meteorol Clim* 3: 299–306.

Tudor M, Ivatek-Šahdan S (2002) MAP IOP 15 case study. *Hrvatski meteorološki časopis* 37: 1-14.

Tutiš V (1988) Bora on the Adriatic coast during ALPEX-SOP on 27 to 30 April 1982. *Rasprave* 23: 45-56.



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

Večenaj Ž, De Wekker SFJ, Grubišić V (2011) Near-surface characteristics of the turbulence structure during a mountain-wave event. *J Appl Meteorol Clim* 50(5): 1088-1106.

Večenaj Ž, Belušić D, Grubišić V, Grisogono B (2012) Along-coast features of bora related turbulence. *Bound-Lay Meteorol* 143(3): 527-545.

Večenaj Ž (2012) Characteristics of the Bora related turbulence. Doktorski rad. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet.

von Kármán (1948) Progress in the Statistical Theory of Turbulence. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 34(11): 530–539.

Vučetić V (1988) Bora on the northern Adriatic 12-18 April 1982. *Rasprave*, 23, 27-44.

Vučetić V (1991) Statistical analysis of severe Adriatic Bora. *Croatian Meteorological Journal* 26: 41–51.

Wilks DS (1995) *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Academic Press, New York, NY, USA, 627 str.

Yoshino M M (1976) *Local wind bora*. University of Tokyo Press, Tokyo, Japan, 289 str.

## ŽIVOTOPIS

Petra Lepri rođena je 25. listopada 1982. godine. Prirodoslovno-matematičku gimnaziju, XV Gimnaziju, završila je 2001. nakon čega je upisala studij Fizike na Prirodoslovno-matematičkom fakultetu. Nakon završetka studija zapošljava se u Državnom hidrometeorološkom zavodu gdje radi u Samostalnoj službi za umjerni laboratorij.

Na studiju Geofizike, usmjerenje meteorologija i fizika oceanografija, diplomirala je u lipnju 2009. godine s temom „Makjanićev matematički model bure“. Sveučilišni poslijediplomski doktorski studij upisuje 2011. godine na Prirodoslovno-matematičkom fakultetu, smjer Fizika atmosfere. Uz stalan posao kontinuirano se stručno i znanstveno usavršava te sudjeluje na međunarodnim konferencijama. Rezultate rada objavila je u tri znanstvena članka u časopisima zastupljenima u *Current contents*. Članica je Hrvatskog meteorološkog društva.

### **Izvorni znanstveni radovi u časopisima indeksiranima u *Current Contents*:**

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

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

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

### **Sudjelovanje na konferencijama:**

P Lepri, Ž Večenaj, H Kozmar, B Grisogono (2016) Seasonal variability of near-ground Bora turbulence. *Proceedings of the 8th International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics and Applications*, Northeastern University, Boston, Massachusetts, SAD, 07.-11.06.2016. (predavanje)

P Lepri, Ž Večenaj, H Kozmar, B Grisogono (2015) Bura turbulence in comparison with international wind engineering standards. Meteorološki izazovi 4, Zagreb, 24.-25.11.2015., Hrvatsko meteorološko društvo (predavanje).

P Lepri, Ž Večenaj, H Kozmar, B Grisogono (2015) On the near-ground Bora turbulence. 33rd International Conference on Alpine Meteorology (ICAM 2015), Innsbruck, Austrija, 31.8.-04.09.2015. (poster).

P Lepri, Ž Večenaj, H Kozmar, B Grisogono (2015) A summertime near-ground turbulence of the Bora wind. Proceedings of the 8th International Congress of Croatian Society of Mechanics, Kožar, Ivica; Bićanić, Nenad; Jelenić, Gordan; Čanadija, Marko (ur.), Rijeka: Grafika Helvetica, 2015. 58-58 (predavanje).

P Lepri, H Kozmar, Ž Večenaj, B Grisogono (2014) Some features of near-ground Bora turbulence. Workshop on advances in meso- and micrometeorology, Donja Stubica, Croatia, 03.-04.11.2014. (predavanje).

P Lepri, H Kozmar, Ž Večenaj, B Grisogono (2014) A summertime near-ground velocity profile of the Bora wind. Proceedings of the 2014 World Congress on Advances in Civil, Environmental and Materials Research, Choi, Chang-Koon (ed.), Daejeon : Techno Press, 2014. 78-78 (predavanje).

P Lepri, H Kozmar, Ž Večenaj, B Grisogono (2013) On the Bora near-ground velocity profile. Meteorološki izazovi 3, Zagreb, 21.-22.11.2013, Hrvatsko meteorološko društvo (poster).