

Turbulencija bure iznad brdovitog priobalnog terena

Golem, Petar

Doctoral thesis / Doktorski rad

2025

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:217:657527>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-02**



Repository / Repozitorij:

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





Sveučilište u Zagrebu

PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

Petar Golem

**Turbulencija bure iznad brdovitog
priobalnog terena**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2025.



Sveučilište u Zagrebu

PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

Petar Golem

**Turbulencija bure iznad brdovitog
priobalnog terena**

DOKTORSKI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Branko Grisogono

Prof. dr. sc. Hrvoje Kozmar

Zagreb, 2025.



University of Zagreb

FACULTY OF SCIENCE
DEPARTMENT OF GEOPHYSICS

Petar Golem

**Bora wind turbulence above complex
coastal terrain**

DOCTORAL DISSERTATION

Supervisors:
Prof. dr. sc. Branko Grisogono
Prof. dr. sc. Hrvoje Kozmar

Zagreb, 2025

Ova doktorska disertacija je izrađena uz službeno mentorstvo prof. dr. sc. Branka Grisogona i prof. dr. sc. Hrvoja Kozmara, te neslužbeno mentorstvo izv. prof. dr. sc. Željka Večenaja. Disertacija je izrađena u sklopu Sveučilišnog poslijediplomskog studija pri Geofizičkom odsjeku Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Prof. dr. sc. Branko Grisogono je redoviti profesor pri Geofizičkom odsjeku Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Prof. dr. sc. Hrvoje Kozmar je redoviti profesor pri Zavodu za mehaniku fluida na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu.

Disertacija je izrađena u sklopu projekata Hrvatske zaklade za znanost IP-2016-06-2017 i IP-2022-10-9434. Rad doktoranda Petra Golema financiran je iz „Projekta razvoja karijera mladih istraživača – izobrazba novih doktora znanosti“ (DOK-2020-01-5006). U okviru disertacije korištena je usluga „Napredno računanje“ Sveučilišta u Zagrebu Sveučilišnog računskog centra (Srce).

Značajan dio ove disertacije se temelji na trima člancima objavljenim u relevantnim međunarodnim časopisima. U kronološkom poretku, to su:

1. 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. *Boundary-Layer Meteorology*, 183, 495–504. doi: 10.1007/s10546-022-00689-7
2. Golem, P., Večenaj, Ž., Kozmar, H., Grisogono, B. (2023) The effect of orography on bora wind turbulence. *Boundary-Layer Meteorology*, 187, 193–212. doi: 10.1007/s10546-022-00767-w
3. Golem, P., Večenaj, Ž., Kozmar, H., Grisogono, B. (2024) Misalignment between the propagation direction of the bora wind and its pulsations. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 150(759), 1194–1205. doi: <http://dx.doi.org/10.1002/qj.4679>

ZAHVALE

Zahvaljujem se svojim mentorima, profesorima Branku Grisogonu i Hrvoju Kozmaru, kao i neslužbenom mentoru, profesoru Željku Večenaju, za pomoć tijekom ovog procesa, kao i za moralnu podršku u stresnim trenucima.

Zahvaljujem se doc. dr. sc. Ivanu Tomanu na potpori tijekom provedbe numeričke simulacije opisane u drugoj cjelini ovog rada, kao i za diskusiju o numeričkom modeliranju. Zahvaljujem se dr. sc. Goranu Gašparcu i profesoru Danijelu Belušiću na savjetima o pokretanju WRF-a i akademiku Mirku Orliću za prijedlog korištenja rotacijske spektralne analize.

Duboke zahvale pružam kolegama iz AK Forca s kojima sam naučio da je ponekad najvažnija stvar staviti jednu nogu ispred druge, kao i za dijeljenje mnogih sretnih trenutaka na utrkama. Vaš entuzijazam tri puta tjedno (ponekad i više!) mi je ogromna pomoć.

Također se zahvaljujem mojim prijateljima i kolegama s odsjeka na druženjima i internim kvizovima.

Naposljetku, od ključne važnosti bila je bezuvjetna podrška moje obitelji. Hvala vam na vašoj vjeri u mene.

SAŽETAK

Tema ovog rada su mikro- i submezoskalna svojstva bure u zavjetrini sjevernog dijela Dinarida. Rad je podijeljen u tri cjeline, pri čemu se dvije cjeline odnose na turbulenciju bure u prizemnom sloju atmosfere, specifično, njene statističke značajke i numeričku simulaciju. Treća se cjelina odnosi na horizontalne rotacijske značajke pulsacija bure – njihov opis i numeričko modeliranje.

U prvoj cjelini proučavam razlike u statističkim značajkama turbulencije bure u prizemnom sloju atmosfere, i to na dvjema bliskim postajama, Senju i Vratniku (jedna u podnožju, a druga na grebenu planine), za skup podataka u trajanju od približno 6 mjeseci. Slična analiza značajki turbulencije bure do sada nije provedena za ovako dug vremenski period. Analiza potvrđuje neka saznanja prijašnjih radova temeljenih na usporedbi ove dvije postaje za jedan izdvojen događaj bure, npr. da je kinetička energija turbulencije (TKE) u Senju dvostruko veća u odnosu na Vratnik. Raspodjela viskozne disipacije TKE (ε) na dvjema postajama približno je jednaka, što je u suprotnosti s prethodnim zaključcima utemeljenim na jednom događaju bure. Dvije vremenske skale koriste se za odvajanje turbulencije od mezoskale – konstantna (15 min) i varijabilna; potonja je korištena s ciljem odvajanja submezoskalnih gibanja od lokalne turbulencije. Zaključci su u pravilu nepromijenjeni s obzirom na odabir vremenske skale. Podaci na postajama uspoređeni su s obzirom na teoriju sličnosti neutralnog prizemnog sloja (NPS). Odstupanja od NPS-a na Vratniku su manja od onih u Senju, što znači da je ravnoteža TKE na Vratniku bliža NPS-u (tj. smično-disipacijskoj ravnoteži). Određena odstupanja karakteristična su za utjecaj sloja hrapavosti (SH), s obzirom da je visina mjernih uređaja na objema postajama usporediva s visinom elemenata hrapavosti u njihovoj blizini. Ovo je posebice zamjetno u pomacima spektralnih maksimuma prema nižim frekvencijama. Utjecaj SH također pomaže objasniti neočekivanu jednakost ε na dvjema postajama. Naime, jedna od značajki SH nelokalni su ponori TKE koji smanjuju ε , a koja uobičajeno samostalno uravnotežuje izvore TKE. Utjecaj SH je prisutan i kod ovisnosti statističkih momenata o azimutu prizemnog vjetra, što se može objasniti anizotropijom površinske hrapavosti. Izračunate su integralne duljinske skale turbulencije i intenzitet turbulencije. Postignute vrijednosti intenziteta u skladu su s preporučenim vrijednostima, ali odstupaju od vrijednosti izmjerenih na srednjem Jadranu.

Druga cjelina usredotočena je na izračun mikroskalnih svojstava bure (preciznije, TKE) numeričkim modelom. Za validaciju simulacije korišten je skup podataka prikupljen u zaleđu grada Rijeke na 100-m tornju s anemometrima na 5 visina. Ovo predstavlja dosad najviša neprekidna toranjska mjerenja brzine vjetra i turbulencije bure u prizemnom sloju atmosfere. Osim 10-min usrednjenih vrijednosti horizontalne brzine i smjera vjetra, anemometri su mjerili i standardne devijacije, što omogućava procjenu TKE i usporedbu sa simulacijom. Ovo je značajno jer je usporedba dosad provedenih simulacija, izuzev avionskih ili indirektnih mjerenja, u pravilu provedena s mjerenjima na relativno niskoj razini iznad tla. Simulacija koraka mreže 0,3 km je provedena za slučaj ekstremno dugotrajnog niza jakih do orkanskih bura iz siječnja i veljače 2012. godine, a kojeg su mjerni uređaji na tornju zabilježili u cijelosti. Točnost simulacije usrednjene vrijednosti brzine i TKE je u rasponu od razumne do izvrsne, ovisno o brzini vjetra i dubini bure. Periodi s izvrsnim podudaranjem su zabilježeni pri brzini vjetra većoj od 20 m s^{-1} i tijekom plitke bure, dok je podudaranje tijekom duboke bure te pri početku i kraju događaja lošije. Podudaranje je usporedivo sa simulacijama bure na južnom Jadranu, također relativno kratkog koraka mreže, dok odstupanja zabilježena kod većeg koraka mreže naglašavaju važnost reprezentacije reljefa u brdovitom terenu.

U trećoj cjelini proučavam rotacijske značajke pulsacija bure u horizontalnoj ravnini – njihovu strukturu, orijentaciju i smjer rotacije – koristeći rotacijsku spektralnu analizu. Metoda je primijenjena na događaje bure iz istog skupa podataka u Senju kao u prvoj cjelini. Struktura pulsacija je kvazilinearna, tj. česti zraka osciliraju duž izduženih elipsa, a os oscilacije nije jednaka smjeru prizemnog vjetra, već je bliža smjeru vektora smicanja. Doprinos predstavlja rotacija pulsacija u horizontalnoj ravnini, a koja je gotovo isključivo pozitivna, tj. u smjeru suprotnom od kazaljke na satu. Ove značajke ukazuju da su na promatranom skupu događaja bure najvjerojatniji uzroci nastanka pulsacija Kelvin-Helmholtzova nestabilnost ili horizontalno propagirajući zavjetrinski valovi, iako ne nude objašnjenje prevladavajućeg smjera rotacije. Numerička simulacija ljetnog događaja bure je provedena s ciljem proučavanja ovog zapažanja. Simulacija je uspješna s obzirom na period, prevladavajući smjer rotacije i kut između smjera prizemnog vjetra i osi oscilacije pulsacija. Amplituda pulsacija osjetljiva je na vertikalni i horizontalni korak mreže, ali rotacijske značajke nisu. Uzrok pulsacija u simulaciji je Kelvin-Helmholtzova nestabilnost. Ohrabren podudaranjem simulacije i mjerenja, proučio sam prostornu raspodjelu rotacijskih značajki u Velebitskom kanalu. Pozitivna rotacijska komponenta nadjačava negativnu na gotovo čitavom području kanala, iako je njihova relativna jakost vremenski promjenjiva. Iznad Senja i u blizini planinskih vrhova, prevladavajući smjer

rotacije pulsacija koreliran je s poljem vremenski usrednjene vertikalne komponente vrtložnosti, a iznad otvorenog mora sa smicanjem smjera vjetra na vrhu niske mlazne struje. Predlažem da je rotacija na frekvenciji pulsacija uzrokovana naginjanjem vrtložnih linija lateralne komponente vrtložnosti unutar ili ispod vrhova Kelvin-Helmholtzovih valova. U prisustvu smicanja smjera vjetra, naginjanje može imati prevladavajući smjer. Budući rad trebao bi se usredotočiti na analizu polja vertikalne komponente vrtložnosti u simulacijama sa stvarnim i idealiziranim reljefom.

KLJUČNE RIJEČI

Bura • turbulencija • pulsacije • brdovit priobalan teren • toranjska mjerenja • Weather Research and Forecasting Model • rotacijska spektralna analiza

EXTENDED ABSTRACT

1 Introduction

Bora is a strong, gusty wind that occurs along the eastern coast of the Adriatic. It belongs to the category of downslope windstorms (e.g., Ólafsson and Ágústsson 2007), and it develops due to synoptic disturbances which pull or push air over the Dinarides. Interest in the study of bora is driven mainly by its gustiness (over 60 m s^{-1} ; e.g., Grisogono and Belušić 2009) and spatial heterogeneity, which causes a myriad of problems in tourism, architecture and traffic (e.g., Keresturi 2014).

Bora research started at the end of the 19th century (Mohorovičić 1889). It initially focused on the spatial and temporal variability of the mean wind speed and duration (e.g., Poje 1992). The analysis of synoptic charts and radiosoundings yielded two classifications of bora events, one with respect to the synoptic disturbance causing the cross-mountain flow, and the second with respect to the flow depth. As a result, bora event can be cyclonic, anticyclonic or frontal (e.g., Yoshino 1976; Jurčec 1988; Heimann 2001), and shallow or deep. Several subjective and objective weather-type classifications have been developed as a prognostic aid (e.g., Poje 1965; Vozila et al. 2021), newest of which claim that the winter cyclonic bora events (associated with the highest wind speed) will become less frequent in the future warming scenarios (Vozila et al. 2021). When it comes to the understanding of the physical causes of severe bora, the most important development occurred as a result of ALPEX (Kuettner and O'Neill 1981) and MAP (Bougeault et al. 2001) projects. Works by Smith (1987) and Klemp and Durran (1987) did away with the notion of bora as a katabatic wind, showing instead that the flow speedup can be caused by two mechanisms, hydraulic transition from sub- to supercritical flow (can be described by two-layer shallow water models), and nonlinear amplification and breaking of mountain waves (the stratified fluid case). Both mechanisms can be present at the same time, and their relative importance depends on the stratification profile, presence and height of the critical level (level where the cross-mountain flow component is zero) and other effects (e.g., Smith and Skillingstad 2011). In both cases, the resulting lee flow structure is similar – a strong low-level jet (LLJ) develops, topped by a layer of low wind speed and near neutral static stability (the stagnation zone).

The breaking mountain wave and the LLJ present a „stage“ of sorts for this thesis. It is split into three chapters; two deal with the turbulence developed at the lower boundary of the LLJ, and the third aims to describe the horizontal rotational characteristics of bora pulsations

(submesoscale motion originating from the wave breaking region or the boundary between the LLJ and the stagnation zone; Figure 3) using point measurements and a numerical model simulation. The next three subsections summarize the relevant literature and motivation for each chapter, while the fourth presents the goals and structure of the rest of the text.

1.1 Bora turbulence measurements

As a result of strong shear at the LLJ top and bottom, strong turbulence is developed in the lee of the mountain. Turbulence strength in the lower layer is characterized by a handful of statistical properties like the turbulence kinetic energy (TKE), its dissipation rate (ε) and turbulent fluxes of heat, momentum, moisture, etc. Specialized fields like wind engineering use different but related statistical properties like the turbulence intensity, gust speed and integral turbulence length scales. How these properties relate to each other and vary with height is published in engineering compendia as benchmarks in calculating wind loads on structures.

The first high-frequency measurements of bora-related turbulence were undertaken within ALPEX and MAP projects (aircraft-mounted instruments sampled alongshore and cross-shore profiles of TKE; Smith 1987; Večenaj 2012). First mast-mounted instrument was installed in 2001 at the town of Senj (cup anemometer; 1 Hz sampling rate); Belušić et al. (2006) used these measurements to distinguish local turbulence and low-frequency pulsations. From 2004 to 2006, a pair of 3D anemometers (4 Hz sampling rate) was mounted at Senj and at the Vratnik pass (~10 km to the east of Senj). Using this data, Belušić and Klaić (2006) show that TKE at Senj can reach values as high as $40 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$. Večenaj (2012) compared a single bora event that occurred simultaneously at the two stations, and concluded that both TKE and ε are twice as large at Senj; therefore, turbulence strength grew along the downslope (Senj is located at the foothill, and Vratnik at the mountain ridge). The importance of turbulence averaging interval selection was emphasized; overly large averaging interval can include motions such as pulsations into turbulence, inflating TKE and related statistics by as much as ~30%. Belušić et al. (2013) also used this dataset to identify simultaneous flow regimes between the two stations via clustering.

Sustained interest in bora turbulence lead to further experiments. Within the frame of the WINDEX project (Horvath et al. 2010a, b), a tower with ultrasonic anemometers at several heights was installed in the hinterland of the city of Split. This dataset was used to point out the error in applying established engineering codes (mostly developed from data measured over

flat, homogeneous terrain) to areas under the influence of bora (Lepri et al. 2015; 2017), to test the applicability of the Monin-Obukhov (MOST) similarity theory (Babić 2013; Babić et al. 2016b; Lisac 2014), to evaluate higher statistical moments (Večenaj et al. 2021) and the TKE balance, etc. Further instruments were installed at the Maslenica bridge (Večenaj et al. 2015), and used to show that the distributions of the turbulence statistical properties do not depend on the bora synoptic type (Šoljan et al. 2018) and to study jugo wind turbulence (Zajec 2022). The most recent measurement campaign – project SESAR – focused on the effect of the bora turbulence on the air traffic at the Dubrovnik airport (e.g., Jurković et al. 2018)

Within the context of the bora turbulence properties, these studies fall into one of the two categories. In the first, a large dataset at a particular station is analyzed (e.g., Lepri et al. 2017; Lepri 2023). In the second, two measurement locations are compared for a single simultaneous bora event (Večenaj 2012). A long-term comparison of bora turbulence statistics for two or more stations was not undertaken thus far. This represents the main motivation for this chapter. Best candidates for this comparison are the stations in Senj and at the Vratnik pass; the first is located at the foothill of the coastal mountain range, and the second one is located atop the ridgeline, ~10 km to the east of Senj. Both stations have recorded a large amount of simultaneous bora events spanning the 9-month interval from September 2004 to June 2005.

1.2 Numerical modeling of bora turbulence

Measurement campaigns outlined in the previous section were followed by numerical experiments with steadily decreasing numerical grid spacing. Along-coast jet and wake distribution was successfully reproduced even with ~3 km grid spacing (Enger and Grisogono 1998; Grubišić 2004; Belušić and Klaić 2006). Decreasing the spacing to ~1 km enabled study of submesoscale structures such as pulsations, rotors and lee waves (Belušić et al. 2007; Stiperski et al. 2012; Horvath et al. 2013). This decrease was especially important for the reproduction of near-ground wind in the immediate lee of coastal mountains. A good recent example is the well-reproduced wind speed at the Dubrovnik airport (ZLD) in Večenaj et al. (2019); they used a 0.5 km grid spacing and achieved substantial improvements with respect to coarse 8- and 4 km simulations (Simić 2019). A good example of errors caused by coarse grid spacing in the study of downslope windstorms is provided in e.g., Ágústsson and Ólafsson (2014).

Micrometeorological measurements described in the previous section also sparked interest in studying the ability of numerical models and planetary boundary layer (PBL) schemes to reproduce bora turbulence statistics. Here as well, the errors tend to decrease with grid spacing, although it depends on the vicinity of complex terrain. Offshore, even coarse grid spacing may yield good agreement with the measurements of TKE and its dissipation rate (Večenaj et al. 2012). This is not true in the immediate lee of the mountains, e.g., Belušić and Klaić (2006) and Simić (2019) compared surface TKE measurements at, respectively, Senj and Vratnik and at the ZLD (~10 m instrument mounting height) with simulations with 3 and 4 km grid spacing. TKE is in both cases underestimated by a factor of 3–4. Večenaj et al. (2019) simulated a bora event at the ZLD, but they instead used a 0.5 km grid spacing and obtained very good agreement with the TKE measurements. Even finer simulations (in the so-called large-eddy mode) were used to study TKE balance in the hinterland of Split (Horvath et al. 2013); the model output was verified using measurements at 10 m, 22 m and 40 m above the ground.

One of the main issues regarding the simulation of turbulence in downslope windstorms, except the terrain representation which in principle can be solved by using more computational resources, concerns the parametrization schemes of the momentum, heat and moisture exchanges in the surface layer and the PBL. Most of these schemes were developed using data above flat and homogeneous terrain, often underestimating turbulence length scales (Grisogono and Belušić 2009; Večenaj et al. 2010; Večenaj 2015). Consequently, surface wind speed can be overestimated and position of the lee rotor can be misjudged (e.g., Muñoz-Esparza et al. 2016). These discrepancies are, in part, due to a lack of measurements, especially at heights above a few dozen meters above the ground level (a.g.l.). From the measurement campaigns outlined in the previous section, only the WINDEX campaign delivered high-frequency measurements above 20 m a.g.l., although this was partially supplemented by airplane (MAP project; Bougeault et al. 2001), sodar (Stiperski et al. 2012; Horvath et al. 2013) and lidar measurements (Jurković et al. 2018). Therefore, additional measurements of the mean wind speed and turbulence are needed, especially above ~20 m a.g.l. Using such measurements, the ability of the numerical model to reproduce vertical wind and turbulence profiles can be evaluated. In January 2012, a 100-m tower with anemometers at five heights was installed in the hinterland of the city of Rijeka. Besides the mean wind speed and direction, the instruments also recorded their standard deviations, thus enabling the estimation of the TKE and its comparison to numerical model results. In January and February of 2012, the instruments

recorded a three-week series of strong to severe bora events. Presenting this dataset and comparing it to the model output presents the main motivation of this chapter.

1.3 Bora pulsations

Pulsations, i.e., quasi-periodic motions with periods of 1–20 min represent a type of secondary instability caused by the strong shear in the wave breaking region and at the LLJ-stagnation zone interface (e.g., Figure 1). They were first studied in the famous Boulder windstorm (e.g., Zipser and Bedard 1982), where structures with decoherence length of ~10 km could be observed (via lidar) moving with the mean wind (Neiman et al. 1988). In numerical experiments, three pulsation generation mechanisms were identified, Kelvin-Helmholtz instability (KHI; Scinocca and Peltier 1989; Peltier and Scinocca 1990), tilting of the base-state vorticity associated with the breaking mountain wave (Clark and Farley 1984), and the trapped, travelling lee waves (Clark and Hall 1994). A schematic view of all three mechanisms is shown in Figure 3. Pulsations exist in bora as well. First measurements and theoretical considerations originate in the late 1980s (Rakovec 1987; Petkovšek 1987). Further development occurred at the start of 2000s due to the installation of a high-frequency (1 Hz) anemometer at the town of Senj. In a series of papers, Belušić et al. (2004; 2006; 2007) reveal the underlying phenomena regarding the cessation of pulsations and the appearance of a high-level jet. They simulate the pulsations using COAMPS model, identifying KHI as the generating mechanism for that particular bora event. Furthermore, Orlić et al. (2005) use 3D anemometer data (mounted at Senj in 2004) to point out the difference in pulsations and turbulence. Pulsations were studied at other locations at the Adriatic coast as well, e.g., Horvath et al. (2013) observed pulsations with periods of 3–15 min. They found that the latter are connected to the upstream variation in profiles of wind speed and static stability.

The research focus in the past was the period, wavelength and phase speed of the pulsations, as well as their numerical simulation. The aim of this chapter is to study the characteristic structure of pulsations in the horizontal plane using the rotational spectral analysis method – RSA (Gonella 1972; O’Brien and Pillsbury 1974). RSA (described in the Section 4.3.3) decomposes the 2D vector time series (at a certain frequency) into a positively and negatively rotating component, and can give insight into properties such as the preferred sense of rotation, coherence and the type of motion (rectilinear, circular or elliptical). RSA was previously used at the Adriatic coast in the study of diurnal rotation of sea breeze (Prtenjak et al. 2008) and the rotational characteristics of bora in the vertical plane (Orlić et al. 2005). Latter example is

notable since RSA showed that pulsations and local turbulence exhibit different structures, and thus have different generating mechanisms. The choice of the subject and the method was motivated by observing a large set of bora events recorded by a 3D anemometer at the town of Senj. After the rotation of the data into the mean-wind system, I noticed large variability in the ratio of the pulsation energy in the along-wind and cross-wind directions, even within a single bora event. This variability implies change in either the orientation of the structure, or its type (i.e., from rectilinear to circular). Since different pulsation generation mechanisms produce different structures in the horizontal plane (Section 3.2), RSA can be used to deduce the dominant one. Finally, a numerical model (WRF-ARW) can be used to reproduce these characteristics and (if successful) study their spatial and temporal variability.

1.4 Objectives and structure

The aim of the first chapter is to compare the statistical properties of the bora turbulence at two nearby stations, one at the foot of the mountain and the other at a ridgeline, for a large number of bora events. The combination of length of the analyzed dataset and the comparison of turbulence statistical properties at two stations represents the original contribution of this chapter. After the selection of an appropriate turbulence averaging interval (constant or variable), I will calculate the TKE, ε , momentum flux and other relevant parameters. Because of the differences in the surface cover and instrument mounting height (Section 4.1.2), the data is compared in the context of the statically neutral surface layer similarity (Section 3.1). The deviation of the nondimensional statistical properties from theoretical values can point towards possible differences in the TKE balance between the two stations.

In the second chapter, I intend to verify the ability of the WRF-ARW numerical model to reproduce vertical profiles of the TKE. To do this, a dataset collected at a 100-m mast installed in 2012 in the hinterland of the city of Rijeka with anemometers at five levels (Section 4.1.1) is used. This represents the highest continuous tower measurements of bora wind speed and turbulence in the surface layer. At the end of January and through most of the February of 2012, the instruments recorded a series of consecutive strong bora events. The length of the recording enables a comparison of the obtained results and the simulation from the initial stages of the series to its termination, as well as during change in the bora flow depth.

In the final chapter, the horizontal rotational characteristics of pulsations in bora wind are studied using the RSA method, linking them to the dominant pulsation generation mechanism.

I intend to verify if these characteristics can be reproduced by a numerical model (WRF-ARW), and if so, to study their spatial and temporal distributions. To the best knowledge, horizontal rotational characteristics of pulsations in bora have not been studied thus far.

The remainder of the thesis is structured in the following manner. Section 3 contains the theoretical background. Section 4 presents the measurements and measurement locations (Senj, Vratnik and the tower in the hinterland of Rijeka), as well as the methods employed in data analysis. Section 5 presents the results and it consists of three self-contained chapters. Section 6 recapitulates the results of all three chapters, and is followed by the optional appendix.

2 Data and methods

For the purposes of comparison of the measured and simulated profiles of the mean wind speed and TKE, a 100-m tower in the hinterland of the city of Rijeka is used. Among the instruments, cup anemometers and wind vanes were mounted at heights of 25 m, 50 m, 75 m and 98 m a.g.l. (Figure 4), yielding 10-min values of the mean wind speed and its standard deviation, and the mean wind direction and its standard deviation (full list of measured variables is given in the Table 1). The standard deviations in particular enable the estimation of the TKE (Appendix A1). The tower was located at the windward side of the coastal mountains, but on the leeward side of the overall mountain chain (approximate location 45°N, 15°E), with its base at 625 m above the mean sea level (a.m.s.l.). Local terrain had a 10° slope in the SW–NE direction, and was covered by dense evergreen forest (average tree height of several meters) and large boulders (~1 m in diameter). This is, to the best knowledge, the tallest tower ever used for bora research. The period from January 23rd to February 16th was selected for comparison, when the northern Adriatic was battered by a series of strong to severe bora events (mean wind speed at times higher than 20 m s⁻¹) lasting for more than 20 days (e.g., Kuzmić et al. 2015).

To compare the turbulence statistics and study the pulsations' horizontal rotation, two towers at the town of Senj and at the nearby Vratnik mountain pass are chosen (Figure 5). The position of the towers and their height is given in Table 2. Both towers featured a 3D WindMaster (Gill Instruments) sonic anemometer with 4 Hz sampling frequency at a single height, but without the measurement of sonic temperature (hence, fluxes of heat are unavailable). The data collected at these towers spans the interval from March 2004 to June 2006 (Senj) and from October 2004 to September 2005 (Vratnik). The tower at Senj was located at the foothill of a coastal slope in a semi-urban environment, with the local house height (z_H) comparable to the

height of the instrument (z ; $z/z_H \sim 1.3$). The Vratnik mountain pass is located ~ 10 km to the east of Senj at a height of ~ 700 m a.m.s.l. The tower was surrounded by a dense evergreen forest with average tree height (at the time) of ~ 5 m (with the instrument at 9.5 m a.g.l., $z/z_H \sim 2$). The larger surface roughness in Senj and the contrast in z/z_H impacts the turbulence characteristics at the two stations.

Bora events were extracted at the two stations (defined as wind with azimuth from 0° to 90° , lasting for a minimum of 3 h). Only events that occurred simultaneously at the two stations were further analyzed. A time scale (τ) was determined that separates the turbulence from the large-scale motions. To determine τ , the spectral gap method was used (e.g., Metzger and Holmes 2008), which relies on the identification of a wide area of low energy in the (co)spectra of wind velocity components. The position of this gap can change in time, so the simultaneous bora events are split into 6-h segments. The time scale τ is then determined in two ways. First, a constant τ (equal to 15 min) is identified from the composite spectra (Figure 8a), and used for all the 6-h segments at both towers. Alternatively, each 6-h segment is assigned a different τ based on the gap identified from the (co)spectra of that particular segment. This was done because time series at Senj (and to a much lesser extent at Vratnik) often exhibit submesoscale motions (like the pulsations) at periods of several minutes. These motions differ from turbulence (Belušić et al. 2006), so τ was chosen to lie in the gap between the turbulent and the submesoscale peak (example shown in Figure 8b). τ determined in this manner is not the same at both stations for the same 6-h segment. By using two different time scales, the effect of submesoscale motions on the turbulence properties can be evaluated.

Once τ is determined, every 6-h segment is split into subsegments of length T (equal to 1 h) and the statistical properties of turbulence are calculated. The length of 1 h is arbitrary; for the time-average statistics to converge to their ensemble values, T should in general be several times larger than τ (Lenschow et al. 1994). For each subsegment, the time series of velocity components are double-rotated into the system of the mean wind (Kaimal and Finnigan 1994). They are further separated into a high-pass filtered fluctuation (cutoff frequency equal to τ^{-1}) and the low-frequency remainder. The following parameters are then calculated for each 1-h subsegment: the mean longitudinal velocity, TKE dissipation and the components of the Reynolds stress tensor (eqn. 4.2). Intervals which do not satisfy the Taylor hypothesis (e.g., Stull 1988), or which exhibit high degree of non-stationarity, are flagged and not used in the

analysis. The result is that each station (Senj and Vratnik) has two sets of statistics, one for constant and one for variable τ . TKE dissipation is calculated using the inertial dissipation method (eqn. 4.4; e.g., Tennekes and Lumley 1972), justified by the presence of the -5/3 slope in the spectra of the wind velocity components, even if the strict criterion of isotropic turbulence was not observed.

To analyze the rotational characteristics of the pulsations in the horizontal plane, I used the rotational spectral analysis method – RSA (Gonella 1972; O’Brien and Pillsbury 1974). The horizontal velocity vector is represented as a complex number ($w = u + iv$, where u and v are the zonal and meridional velocity), and its Fourier transform is calculated, giving complex amplitudes (w_{\pm}) associated with positively and negatively rotating component at a given frequency (eqn. 4.5). Several parameters can be calculated from these amplitudes, characterizing the type of structure (R_{ab} ; circular, elliptical or rectilinear), its orientation (α ; eqn. 4.7) and its coherence (E ; eqn. 4.7). Figure 10 shows the types of motion associated with different values of R_{ab} and α . RSA was previously used to study the diurnal sea breeze rotation (Prtenjak et al. 2008) and the vertical-plane structure of the bora flow (Orlić et al. 2005) at the Adriatic coast.

3 Results, discussion and conclusions

3.1 Bora turbulence characteristics in Senj and at Vratnik

The distributions of the statistical properties (TKE, ε and Reynolds stresses) at the two stations are compared. The TKE and the turbulent fluxes are 1.5–2 times larger in Senj (depending if the submesoscale motions are filtered out or not), which is similar to the results found in previous studies which analysed only single episodes (Večenaj 2012). This is probably due to the contrast in the surface roughness. The distributions of ε are nearly equal at the two stations, contrasting with the previous analyses (Večenaj 2012) which found that, like the TKE, ε was also ~2 times larger at Senj. This mismatch is caused by large variability in the ratio of ε at the two stations, meaning that conclusions on their relative magnitudes at the two stations cannot be drawn on the basis of a single bora episode.

Since the magnitudes and the profiles of statistical quantities in the PBL depend on the balance of sources and sinks of the TKE, I estimated the deviation of the TKE balance at the two stations from the neutral surface layer (NSL). A detailed TKE balance analysis requires

measurements at several levels, so instead I compared the relationships between TKE, ε and U , which in the NSL (where the dominant TKE balance terms are shear production and ε ; eqn. 1.1) is expected to yield $\varepsilon \propto U^3$, $\text{TKE} \propto U^2$ and $\varepsilon \propto \text{TKE}^{3/2}$. The exponents at Vratnik are closer to these values (2.76, 2.09 and 1.19, respectively) than those at Senj (1.52, 1.35 and 1.30, respectively), indicating that the TKE balance at Vratnik is closer to the shear-dissipative balance (Table 4 and Figure 12). Large spread of data in the scatter plots in Senj is partly due to the surface roughness anisotropy, meaning that the statistical properties at Senj exhibited the wind direction effects (Figure 13).

Instruments at the stations are located relatively close to the rough ground surface, so the measurements can be influenced by the roughness sublayer (RSL). Turbulence in the RSL exhibits deviations from the shear-dissipative balance of the NSL (Section 3.1), so I explored if the deviations from this balance at the two stations are characteristic of the RSL. Kaimal and Finnigan (1994; KF94 from now on) and Roth (2000) compiled the profiles and values of nondimensional spectra, variances etc. in the RSL above urban and forested surfaces, and were used as benchmarks. Several markers of the RSL influence exist at the two stations. The nondimensional variances of the u and v velocity component are smaller than the NSL values (Figure 14). The nondimensional velocity spectra show a shift in their peak values towards the low-frequency end of the spectrum (Figure 15; Table 5). The latter shows that the RSL effect is stronger at Senj since both the longitudinal (u) and vertical (w) components are shifted, while at Vratnik only the w component is shifted (KF94). Finally, the nondimensional dissipation (ϕ_ε ; eqn. 3.5) is close to the NSL value (one) at Vratnik, and ~ 0.6 at Senj. The reduced dissipation is expected deeper in the RSL since ε is no longer the only sink of the TKE (as is the case in the NSL; KF94). Therefore, I conclude that both stations show deviation from the shear-dissipative balance of the NSL indicative of the RSL, but at Senj it is larger since the anemometer is, relative to the height of the roughness elements, installed at a lower height. This also helps to explain the unexpectedly identical distributions of ε at the two stations, since the much larger shear production at Senj and comparable effective instrument mounting height would, if both stations were above the RSL, produce larger ε in Senj.

The final section (Section 5.1.4) assesses the turbulence length scale (Λ ; e.g., Mellor and Yamada 1974) and the turbulence intensity commonly used in wind engineering. Λ is 2–3 times larger in Senj (Figure 16) due to the larger surface roughness, and depends on the choice of τ

(filtering out pulsations reduced its value by 20–30%). The turbulence intensities ($I_{u,v,w}$; eqn. 12) are in the expected range of values characteristic for the rural and urban surroundings (I_u between 0.2 and 0.35 at Senj and between 0.1 and 0.2 for Vratnik; Counihan 1975). The ratios between the I_u , I_v and I_w are in line with the expected range of values (for both constant and variable τ), but differ from the ratios found in the hinterland of the city of Split (Lepri et al. 2017).

3.2 Reproduction of TKE by numerical model

WRF model (version 4.2; Skamarock et al. 2021) was chosen for the simulation of the bora event. The detailed description of the model setup is given in the Section 5.2.1, but the most important features are the higher-order closure level turbulence parametrization scheme (MYNN; Nakanishi and Niino 2006) and the small grid step combined with high-resolution terrain elevation model (1" horizontal resolution; NASA 2019). Inadequately resolved terrain is associated with most of the errors in the simulations above complex terrain, and can significantly alter the wave breaking mechanics (Ágústsson and Ólafsson 2014). The simulation ran from January 23rd to February 16th, capturing the series of events from its initial phase to cessation.

The quality of the simulation was assessed with respect to the mean values of wind direction, speed and the TKE. Wind direction was steady ($\sim 60^\circ$ on all heights) during the majority of the event, and is excellently reproduced, except at the 50 m level where the wind vane shows signs of malfunction in the latter part of the event (Figure 19). Reproduction of mean wind depended on the bora „flow regime“ (Figure 20), with best results (negligible bias and 10–15% RMSE) associated with shallow bora flow, somewhat worse agreement associated with deep bora flow (20–25% RMSE; positive bias) and worst results in the startup/cessation phases (RMSE up to 60%). Dependency of the simulation quality on flow depth was noted at the southern Adriatic as well (Keresturi 2014). Errors depended on height, with a large positive bias at 20 m a.g.l. due to the presence of a low-level maximum in the simulation. This maximum is not present in the measurements which instead show a logarithmic profile. The values of TKE were estimated using the 10-min mean values of wind speed and the standard deviations of wind speed and direction. The estimation method is provided in Appendix A1. Note that the anemometers did not measure the vertical velocity, so this estimate underestimates the real TKE by roughly 16% (e.g., Panofsky and Dutton 1984). A comparison with the simulated TKE shows the same

dependence on the „flow regime“, with the smallest errors in the shallow bora regime (~20% RMSE) and largest in the startup/cessation phase (RMSE as large as 100%). TKE was in general overestimated by the simulation at all levels. Finally, the model reproduced the TKE decreasing with increasing height.

3.3 Rotational characteristics of bora pulsations

From the same dataset of bora events used in the first chapter, forty 6-h intervals were selected. The criteria for selection are stationarity of wind speed and direction, and strong pulsations present throughout the interval. Using the RSA, a set of rotational parameters (R_{ab} , α and E ; Section 4.3.3) is calculated for every 6-h interval. In general, the ellipse semiaxis ratio (R_{ab}) is small but positive (Figure 25a), indicating that the characteristic motion at the frequency of pulsations is an ellipse traced in the positive (anticlockwise) manner by the horizontal wind velocity vector. The orientation of the ellipse's major axis (α) is not along the near-ground wind, instead being offset by 10° – 50° to its right. When the offset is smaller, the pulsations tend to have a smaller R_{ab} and larger stability (i.e., coherence). There is some difference in the rotational parameters between the bora events associated with a surface high and a surface low, but the difference is not statistically significant (Figure 26b). The small values of R_{ab} and high stability indicate that the pulsations are most of the time associated with wave-like motion. Thus, KHI or the trapped travelling lee waves are the most probable pulsation-generating mechanism. Additionally, examination of running rotational spectra (Figure 27) and comparison with ERA5 profiles (Hersebach et al. 2020) of wind shear nearest to the Senj station show that α is equal to the direction of the shear vector at the top of the LLJ, as expected from KHI or trapped travelling lee waves (Figure 29; e.g., Metcalf and Atlas 1973; Gossard and Hooke 1975). However, these mechanisms do not have a preferred sense of rotation in the horizontal plane, at least not above flat terrain.

To explore this mismatch, a high-resolution numerical simulation using the WRF-ARW model (version 4.3.3; Skamarock et al. 2021) was performed. The grid step in the innermost domain is 0.2 km, putting it into the „gray zone“ of turbulence (e.g., Honnert et al. 2020). The choice of physical parametrizations and domain nesting is described in the Section 5.3.5 (Table 10 and Figure 32). While the existence and the amplitude of the pulsations depend on the choice of the horizontal and vertical grid step, the pulsations' rotational parameters such as ellipse semiaxis ratio (R_{ab}) and its orientation (α) do not. The same summer bora event shown in

Figures 27 and 29 was chosen for the simulation, beginning on May 31st and lasting until June 2nd, 2005. The event was anticyclonic and shallow due to the presence of an inversion and a critical level at the 700–800 mb level.

Comparison of the data output at the gridpoint closest to the tower in Senj shows satisfactory simulation of wind speed and direction (Figure 33a). The spectral amplitude of the pulsations is overestimated, and their cessation during the day is not reproduced well, which is a typical problem for most meteorological models. However, orientation of the axis of oscillation and the preferred sense of rotation are (Figures 33b, 34). Therefore, just as in the measurements, the characteristic motion at the frequency of pulsations is an ellipse traced by the horizontal velocity vector in the positive (anticlockwise) manner. The mechanism responsible for the pulsations is KHI, evidenced by the vertical cross-section of potential temperature (θ) and the Richardson gradient number (Ri), with negative Ri below the crests of the overturning waves and $Ri < 0.25$ along the mountain slope. Additionally, α was aligned perpendicular to the troughs and crests of the KH waves, and parallel to the shear vector at the LLJ top (Figure 35), as expected from KH waves (e.g., Metcalf and Atlas 1973; Gossard and Hooke 1975).

Based on the agreement between the simulation and the measurements, running rotational spectra were calculated for a grid of points spanning the area in the lee of the mountain, over the Velebit channel (Figure 36). This enabled the examination of spatial distributions of rotational parameters. The energy of the positive rotational component (E_+) is larger than the negative (E_-) over most of the domain, and the stability (i.e., coherence) decreased with the distance from the shoreline. The decorrelation length is ~ 10 km, similar to Neiman et al. (1988). Interestingly, the degree to which E_+ was larger than E_- (i.e., R_{ab}) depended significantly on the directional shear at the LLJ top (Figures 38, 39); if there was no directional shear, there was no preferred sense of rotation, but when the mean wind at the LLJ top turned clockwise (i.e., negative), the preferred sense of rotation was positive ($R_{ab} > 0$).

I suggest that the link between the preferred sense of rotation and the directional shear at the LLJ top can be interpreted – under the assumption that the KH waves can locally be represented as travelling plane waves (Appendix A3) – via the dynamics of the vertical component of vorticity (ζ). In the immediate lee of the mountain, the sign of the time-averaged ζ and R_{ab} often coincide, while this is not so over the open sea of the Velebit channel. Instantaneous

fields of ζ suggest that in this area, ζ is produced by the tilting of the horizontal vortex lines within and below the crests of the breaking KH waves. Similar nonstationary production of ζ was noted by Rotunno and Bryan (2020), however in their case it was caused by the transient breaking of the stationary mountain wave. This tilting process could be influenced by the directional shear at the LLJ top, thus favouring production of anomalies of positive (or negative, depending on the direction of the shear) vorticity. Simulations with idealized orography and synoptic flow, as well as the analysis of the vorticity budget with and without directional shear are planned to test this hypothesis. The data analysis for other stations at the Adriatic coast are expected to help generalize these findings.

KEYWORDS

Bora • turbulence • pulsations • complex coastal terrain • tower measurements • Weather Research and Forecasting Model • rotational spectral analysis

POPIS SIMBOLA

- α – Kolmogorovljeva konstanta, orijentacija osi oscilacije pulsacija/orijentacije velike poluosi elipse
- Az – azimut brzine vjetra
- e – kinetička energija turbulencije (TKE)
- E – stabilnost (koherentnost) rotacijskog gibanja
- $\varepsilon, \Phi_\varepsilon$ – viskozna disipacija kinetičke energije turbulencije, bezdimenzijska viskozna disipacija kinetičke energije turbulencije
- f, f_s, n – frekvencija, frekvencija uzorkovanja, bezdimenzijska frekvencija
- $I_{u,v,w}$ – komponente intenziteta turbulencije
- k – von Kármánova konstanta
- \vec{k}, k, l – valni vektor i njegova zonalna i meridionalna komponenta
- λ – valna duljina
- Λ – duljinska skala turbulencije
- μ_x, σ_x – usrednjena vrijednost i standardna devijacija veličine x
- N – statička stabilnost, uzgonska frekvencija
- R_{ab} – omjer male i velike poluosi elipse
- R_{kl} – komponenta Reynoldsovog smičnog tenzora
- Ri – Richardsonov gradijentni broj
- S_\pm – spektar snage pozitivno ili negativno rotirajuće spektralne komponente
- S_x, fS_x – spektar snage i frekvencijom otežan spektar snage veličine x
- \vec{S} – vektor vertikalnog smicanja horizontalnog vjetra
- $\sigma_{u,v,w}, \phi_{u,v,w}$ – standardna devijacija i bezdimenzijska standardna devijacija komponenti brzine vjetra
- T – period usrednjavanja
- τ – vremenska skala spektralnog procjepa
- θ – potencijalna temperatura, azimut horizontalnog vjetra
- $\overline{u_k u_l}$ – kovarijanca turbulentnih k i l komponenti brzine vjetra; isto što i R_{kl}
- u_* – brzina trenja
- z – visina iznad tla; vertikalna koordinata
- z_0 – aerodinamička duljina hrapavosti tla
- z_d – visina istisnuća (engl. *displacement height*)
- z_H – visina elemenata hrapavosti
- z' – efektivna visina iznad visine istisnuća
- ζ – parametar statičke stabilnosti; vertikalna komponenta vrtložnosti

POPIS KRATICA

- AGS – atmosferski granični sloj (engl. *atmospheric boundary layer*)
- ALPEX – ALPine EXperiment
- DB, PB – duboka bura, plitka bura
- ERA5 – ECMWF reanaliza br. 5
- IDM – inercijalno-disipacijska metoda
- KHN – Kelvin-Helmholtzova nestabilnost
- LES – simulacija velikih vrtloga (engl. *large eddy simulation*)
- MAP – Mesoscale Alpine Experiment
- MOST – Monin-Obukhovljeva teorija sličnosti
- NMS – niska mlazna struja (engl. *low level jet*)
- PS, NPS – prizemni sloj (engl. *surface layer*), neutralno stratificirani prizemni sloj
- RMSE – korijen srednje kvadratne pogreške (engl. *root mean square error*)
- RS – ravnotežni sloj (engl. *equilibrium layer*)
- RSA – rotacijska spektralna analiza
- SH – sloj hrapavosti (engl. *roughness sublayer*)
- TKE – kinetička energija turbulencije (engl. *turbulence kinetic energy*)
- TT – transport turbulencijom
- UGS – unutarnji granični sloj (engl. *internal boundary layer*)
- WINDEX – Wind EXperiment
- WRF-ARW – Weather Research and Forecasting-Advanced Research WRF
- PZV – (horizontalno) propagirajući zavjetrinski valovi

SADRŽAJ

| | |
|---|----|
| 1 UVOD I PREGLED LITERATURE | 1 |
| 1.1 Opće značajke bure..... | 1 |
| 1.2 Mjerenja turbulencije bure..... | 2 |
| 1.3 Izračun TKE numeričkim modelom | 4 |
| 1.4 Submezoskalna gibanja i pulsacije..... | 6 |
| 2 CILJEVI I STRUKTURA RADA | 9 |
| 3 TEORIJSKE OSNOVE | 11 |
| 3.1 Turbulencija bure u prizemnom sloju atmosfere | 11 |
| 3.1.1 Sličnost statički neutralnog prizemnog sloja | 13 |
| 3.1.2 Odstupanja u sloju hrapavosti..... | 14 |
| 3.2 Uzroci nastanka pulsacija | 15 |
| 4 PODACI I METODE | 17 |
| 4.1 Mjerni uređaji i opis terena | 17 |
| 4.1.1 Toranj u zaleđu Rijeke | 17 |
| 4.1.2 Tornjevi u Senju i na Vratniku..... | 19 |
| 4.2 Opis skupova podataka | 20 |
| 4.2.1 Toranj u zaleđu Rijeke | 20 |
| 4.2.2 Tornjevi u Senju i na Vratniku..... | 22 |
| 4.3 Metode..... | 23 |
| 4.3.1 Određivanje perioda usrednjavanja | 23 |
| 4.3.2 Procjena viskozne disipacije | 25 |
| 4.3.3 Rotacijska spektralna analiza..... | 27 |
| 5 REZULTATI | 30 |
| 5.1 Značajke turbulencije u Senju i na Vratniku | 30 |
| 5.1.1 Opće značajke..... | 30 |
| 5.1.2 Međuovisnosti statističkih značajki turbulencije..... | 32 |
| 5.1.3 Nehomogenost i utjecaj sloja hrapavosti | 35 |
| 5.1.4 Duljinska skala i intenzitet turbulencije..... | 38 |
| 5.1.5 Diskusija i osvrt..... | 40 |
| 5.2 Izračun TKE numeričkim modelom | 42 |
| 5.2.1 Postavke numeričkog modela | 42 |
| 5.2.2 Usrednjena vrijednost brzine i smjera vjetra | 44 |
| 5.2.3 Usporedba vrijednosti TKE | 47 |
| 5.2.4 Diskusija i osvrt..... | 50 |
| 5.3 Rotacijske značajke pulsacija bure | 52 |
| 5.3.1 Opće značajke..... | 52 |

| | |
|---|-----------|
| 5.3.2 Promjena rotacijskih značajki u događaju bure..... | 55 |
| 5.3.3 Diskusija..... | 57 |
| 5.3.4 Uzrok horizontalne rotacije pulsacija..... | 62 |
| 5.3.5 Opis događaja i postavke numeričkog modela..... | 64 |
| 5.3.6 Validacija simulacije i uzrok nastanka pulsacija..... | 66 |
| 5.3.7 Prostorna raspodjela rotacijskih značajki pulsacija..... | 70 |
| 5.3.8 Vrtložnost i pulsacije..... | 76 |
| 5.3.9 Osvrt i daljnji rad..... | 82 |
| 6. ZAKLJUČAK..... | 85 |
| 6.1 Značajke turbulencije u Senju i na Vratniku..... | 85 |
| 6.2 Izračun TKE numeričkim modelom..... | 86 |
| 6.3 Rotacijske značajke pulsacija bure..... | 87 |
| 6.4 Originalni znanstveni doprinosi..... | 88 |
| PRILOZI..... | 90 |
| A1 Procjena TKE iz standardnih devijacija brzine i smjera vjetra..... | 90 |
| A2 Određivanje sinoptičkog tipa bure..... | 91 |
| A3 Rotacijski spektri i vrtložnost..... | 92 |
| ŽIVOTOPIS..... | 93 |
| LITERATURA..... | 95 |

1 UVOD I PREGLED LITERATURE

1.1 Opće značajke bure

Bura je jak, mahovit, pretežito sjeveroistočan vjetar karakterističan za istočnu obalu Jadrana. Spada u kategoriju zavjetrinskih oluja u koju se ubrajaju vjetrovi poput Föhna (Alpe), Oroshija (Japan), Chinooka i Zonde (sjeverna i južna Amerika). Primjeri sličnih vjetrova mogu se naći u npr. Ólafsson i Ágústsson (2007). Glavni uzrok nastanka bure su Dinaridi (visine 1 do 2 km koja se povećava od sjevera prema jugu) čiji blagi uspon sa sjeveroistočne strane i strm pad prema obali pogoduje lomu planinskih valova pri nailasku zračnih masa iz prvog kvadranta. Bura je u pravilu suha te skoro uvijek hladna (za razliku od npr. Chinooka ili Föhna); nerijetko je srednje brzine veće od 20 m s^{-1} , a na mahove i do 60 m s^{-1} (npr. Grisogono i Belušić 2009; Kozmar i Grisogono 2021). Jedan od glavnih razloga za istraživački interes o ovom tipu vjetra je nepredvidiva mahovitost te izražena turbulencija pri tlu, iznad planinskih vrhova, a ponekad i u višim slojevima troposfere (Klaić i Belušić 2006), što stvara probleme u turizmu, cestovnom, morskom i zračnom prometu, poljoprivredi, građevinarstvu i arhitekturi. Interes je naglašen činjenicom da bura zbog utjecaja reljefa znatno ovisi o vrhovima i usjecima u grebenu priobalnih planina (npr. Grubišić 2004).

Istraživanje bure je počelo krajem 19. stoljeća (Mohorovičić 1889). Početna istraživanja usredotočila su se na prostornu i vremensku raspodjelu usrednjene vrijednosti brzine vjetra i duljine trajanja, uglavnom zbog važnosti za pomorski i cestovni promet (npr. Poje 1992), kao i sinoptičke uvjete pogodne za nastanak bure. Analize sinoptičkih karata (npr. Yoshino 1976; Jurčec 1988; Heimann 2001; Vozila i sur. 2021) su pokazale da se bura može podijeliti na tri tipa: ciklonalnu, anticiklonalnu i frontalnu. Ciklonalne bure su česte zimi te se kreću od sjevernog Jadrana prema Jonskom moru, utječući na vrijeme svojim prednjim ili sjevernim sektorom. Anticiklonalne bure su uglavnom povezane sa širokim poljem visokog tlaka iznad srednje ili istočne Europe. Frontalne bure su kraće i rjeđe, a povezane su s prodorom hladnog zraka nakon prolaska hladne fronte. Nekoliko shema za klasifikaciju tipa vremena je razvijeno kako bi se odredio tip bure, kako subjektivnih (Poje 1965; Yoshino 1976), tako i objektivnih (Heimann 2001; Vozila i sur. 2021). Posljednji rad je istaknuo utjecaj klimatskih promjena na buru; očekuje se da će broj i snaga najjačih, ciklonalnih, zimskih bura, znatno opasti. Bure se također svrstavaju prema dubini strujanja, tj. prema visini do koje azimut srednjeg vjetra ostaje u prvom kvadrantu. Dubina bure utječe na visinu na kojoj se planinski val lomi ili da li se uopće lomi, što utječe na brzinu i karakter prizemnog vjetra (npr. Belušić i sur. 2004, 2007).

Što se tiče razumijevanja uzroka nastanka jake bure, nedvojbeno najvažniji radovi su proizašli iz projekta ALPEX (Kuettner i O'Neill 1981) i MAP (Bougeault i sur. 2001). Radovi prvog projekta predstavljaju promjenu načina razmišljanja o buri; koristeći avionska mjerenja i numeričke simulacije Smith (1987) te Klemp i Durran (1987) pokazuju da bura nije katabatički vjetar (prije općeprihvaćen model, npr. Yoshino 1976), tj. nije izazvana hlađenjem prizemnog zraka i njegovim ubrzavanjem niz padinu. Umjesto toga, ubrzanje strujanja u zavjetrini planine može biti uzrokovano dvjema pojavama: **a**) hidrauličkim ubrzanjem strujanja iz subkritičnog u superkritično pri grebenu planine (može se opisati dvoslojnim modelom plitkog fluida) i **b**) lomom nelinearnih planinskih valova (slučaj s kontinuiranim profilom statičke stabilnosti). Val se može slomiti zbog nelinearnosti ili na već postojećoj, sinoptički uvjetovanoj kritičnoj razini. Oba uzroka mogu biti prisutna u isto vrijeme, a njihova važnost ovisi o stratifikaciji atmosfere, visini atmosferske inverzije iznad planinskog grebena i drugim pojavama (npr. Smith i Skillingstad 2011). Prvi uzrok dobar je model za jake, zimske, mahom plitke bure pri čemu se iznad grebena često može naći niska, sinoptički uvjetovana inverzija i kritični sloj, s južnim ili zapadnim strujanjem iznad inverzije. U oba slučaja je rezultat na zavjetrinskoj strani obronka sličan – razvije se prizemna niska mlazna struja (NMS od sada nadalje) iznad koje se nalazi zaustavno područje (engl. *stagnation zone*) karakterizirana niskom brzinom vjetra, jakom turbulencijom te neutralnom statičkom stabilnosti (Slika 3). Primjer razlika u popratnim gibanjima između ove dvije pojave je opisan u Belušić i sur. (2007).

Lomeći planinski val i NMS koja se ispod njega razvija predstavljaju zajednički nazivnik ovog rada, koji je podijeljen na tri cjeline. Dvije cjeline se odnose na turbulenciju bure koja se razvija na prizemnom, donjem rubu NMS. Tema treće cjeline je opis i numeričko modeliranje horizontalnih rotacijskih značajki pulsacija bure. Ova gibanja nastaju u području loma planinskog vala i/ili na njegovoj granici s NMS-om (Slika 3 u Poglavlju 3.2). Sljedeća tri potpoglavlja sadržavaju pregled literature bitne za svaku od cjelina i pripadajuću motivaciju. U Poglavlju 2 su navedeni ciljevi i struktura rada.

1.2 Mjerenja turbulencije bure

Usljed jakog smicanja, na dnu i vrhu NMS nastaje turbulencija u zavjetrini planine. Prizemni turbulentni sloj atmosfere se opisuje korištenjem nekoliko parametara, npr. kinetičkom energijom turbulencije (TKE od sada nadalje), viskoznom disipacijom kinetičke energije turbulencije (ε) i turbulentnim tokovima količine gibanja, topline i vodene pare. TKE i ε su

važni za numeričke simulacije jer se njihove vrijednosti koriste za definiciju duljina miješanja i parametrizaciju turbulentnih tokova. Netočna parametrizacija ovih duljina može rezultirati graničnim slojevima neodgovarajuće debljine i nepravilnim miješanjem vlage. U aerodinamici okoliša i konstrukcija se koriste drugi parametri poput intenziteta turbulencije i integralnih duljinskih skala turbulencije. Odnosi ovih parametara i njihove vrijednosti na različitim visinama od tla su dane u međunarodnim inženjerskim standardima i koriste se kao preporuka pri procjeni aerodinamičkih opterećenja konstrukcija (npr. ESDU 1976; 1985).

Prva mjerenja turbulencije bure su bila avionska. U sklopu projekata ALPEX i MAP je proučena promjenjivost TKE u smjeru okomitom i paralelnom obali (Smith 1987; Večenaj i sur. 2012). Tek početkom 2000.-ih godina su provedena prva mjerenja anemometrima visoke frekvencije uzorkovanja. U Senju je 2001. godine postavljen šalični anemometar (podaci su sakupljeni od 2001. do 2002. godine), pri čemu su mjerene samo horizontalne komponente brzine. Na temelju ovih mjerenja, Belušić i sur. (2006) su pokazali da se turbulencija u Senju može razdvojiti na lokalni i nelokalni dio. Od 2004. do 2006. godine, par 3D anemometara je postavljen u Senju i 10 km istočno, na prijevoju Vratnik. Koristeći ove podatke, Belušić i Klaić (2006) su pokazali da TKE u Senju može dostići vrijednosti i do $40 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$. Večenaj (2012) je proučio događaj bure koji se istovremeno odvijao na objema postajama, izdvojivši nekoliko zaključaka. Prvo, TKE i ε su bili dvostruko veći u Senju nego na Vratniku, pa je sukladno zaključeno da turbulencija bure raste nizbrdo. Drugo, istaknuta je važnost odabira odgovarajućeg perioda usrednjavanja za točno određivanje TKE. Treće, pokazano je da uključivanje pulsacija u definiciju turbulencije može povećati vrijednost TKE (kao i veličina koje o njoj ovise, npr. duljinske skale turbulencije) i do 30%. Belušić i sur. (2013) su iskoristili navedeni skup podataka kako bi metodom grupiranja (engl. *clustering*) odredili istovremene načine strujanja na ove dvije postaje.

Izražen interes za turbulencijom bure je od 2006. do danas potaknuo postavljanje još nekoliko mjernih postaja. U sklopu projekta WINDEX u zaleđu Splita je postavljen toranj s ultrasoničnim anemometrima na nekoliko visina (Horvath i sur. 2010a, b). U području aerodinamike konstrukcija ovo je vrijedan eksperiment jer je pokazano da mnogi od uvriježenih međunarodnih standarda (npr. ESDU 1976; 1985), mahom određenih na temelju podataka iznad ravnih, homogenih površina, ne vrijede za buru (Lepri i sur. 2015; 2017). Podaci su iskorišteni i za ispitivanje primjenjivosti Monin-Obukhovljeve teorije sličnosti (MOST) za buru (Babić 2013; Babić i sur. 2016b; Lisac 2014), za računanje viših statističkih

momenata brzine vjetra (Večenaj i sur. 2021), kao i za proučavanje jednadžbe ravnoteže TKE (Babić 2013). Toranj s ultrasoničnim anemometrom je postavljen i 2015. godine na Maslenici u zaleđu Zadra (Večenaj i sur. 2015), a prikupljeni podaci su korišteni kako bi se pokazalo da značajke turbulencije bure ne ovise o sinoptičkom tipu bure (Šoljan i sur. 2018) te za proučavanje turbulencije juga (Zajec 2022). Naposljetku, najnovija mjerenja su provedena na jugu Jadrana u sklopu projekta SESAR (npr. Jurković i sur. 2018), s ciljem proučavanja utjecaja turbulencije bure na zračni promet u okolici Zračne luke Dubrovnik.

U kontekstu proučavanja statističkih značajki turbulencije bure, svi navedeni radovi spadaju u dvije grupe. U grupi **a**) je proučen velik skup podataka na jednoj mjernoj postaji (npr. Lepri i sur. 2017), a u grupi **b**) su podaci s dvije mjerne postaje uspoređeni tijekom jednog događaja bure (Večenaj 2012). Dugotrajna usporedba značajki turbulencije bure na dvije ili više postaja dosad nije provedena, što predstavlja motivaciju ove cjeline rada. Najprimjerenije postaje za navedeno istraživačko pitanje su Senj i Vratnik, pri čemu se postaja Senj nalazi u podnožju, a postaja Vratnik na grebenu planine. Na objema postajama je dostupan velik broj događaja bure od rujna 2004. do lipnja 2005. godine.

1.3 Izračun TKE numeričkim modelom

Mjerenja navedena u Poglavljima 1.1 i 1.2 su dopunjena numeričkim simulacijama. Modeli su se pokazali relativno uspješnim po pitanju značajki brzine vjetra duž obale, posebice na sjevernom dijelu Jadrana (Grubišić 2004; Belušić i Klaić 2006; u oba slučaja korak mreže iznosi 3 km). Prateći vremenski slijed objavljenih radova, primjećuje se istovremeno smanjivanje koraka numeričke mreže i odstupanja mjerenja od simulacija. Smanjivanje koraka mreže na 1 km i manje je omogućilo proučavanje submezoskalnih pojava poput pulsacija, rotora, zavjetrinskih valova, zatišja u zavjetrini planinskih vrhova te konvekcije potaknute burom (Belušić i sur. 2007; Stiperski i sur. 2012; Horvath i sur. 2013; Kuzmić i sur. 2015). U brdovitom terenu srednjeg i južnog Jadrana, posebice u podnožju obronaka, smanjenje koraka mreže se pokazalo ključnim za modeliranje brzine vjetra u prizemnom sloju atmosfere. Dobar primjer predstavlja simulacija Večenaj i sur. (2019), koraka mreže od 0,5 km, koja točno predviđa brzinu vjetra oko zračne luke Dubrovnik (ZLD) za duboku i plitku buru. Simulacije većeg koraka mreže često potcjenjuju stvaran nagib terena. Águstsson i Ólafsson (2014) nude uvid u utjecaj prostorne razlučivosti na strujanje zavjetrinskih oluja.

Postavljanje mikrometeoroloških postaja (Poglavlje 1.2) je potaknulo dodatan interes za proučavanje numeričkih modela i parametrizacijskih shema atmosferskog graničnog sloja (AGS) s obzirom na statistička svojstva turbulencije bure. Kao za usrednjene vrijednosti brzine vjetra, i ovdje se može primijetiti smanjivanje pogreške pri smanjenju prostornog koraka mreže. Podalje od obale, ova je pojava manje izražena. Na temelju avionskih mjerenja turbulencije u okviru MAP projekta, Večenaj i sur. (2012) su usporedili skup lokalnih (isključivo vertikalnih) shema AGS-a i ustvrdili da su one u stanju zadovoljavajuće simulirati prostornu raspodjelu TKE iznad otvorenog mora. U ovom slučaju se navodi mala ovisnost TKE o prostornom koraku mreže. U blizini brdovitog terena, korak mreže postaje važan. Na primjer, Belušić i Klaić (2006) i Simić (2019) su usporedili mjerenja TKE u prizemnom sloju atmosfere u Senju, Vratniku i u blizini ZLD (visina postavljanja mjernih uređaja je u oba slučaja ~10 m) s rezultatima numeričkih modela MM5 i ALADIN. Prostorni korak mreže je iznosio 3 km i 4 km. U oba slučaja su vrijednosti TKE potcijenjene 3 do 4 puta. Simulacija Večenaj i sur. (2019), koraka mreže od 0,5 km, pokazuje vrlo dobro podudaranje TKE s vrijednostima izmjerenim na ZLD. Uz još manji korak mreže (~40 m), simulacija velikih vrtloga (engl. *large eddy simulation*; LES) je primijenjena za proučavanje TKE u zaleđu Splita (Horvath i sur. 2013), a rezultati simulacije su provjereni koristeći podatke prikupljene na mikrometeorološkom tornju Pometeno brdo s mjernim uređajima na 10 m, 22 m i 40 m iznad tla.

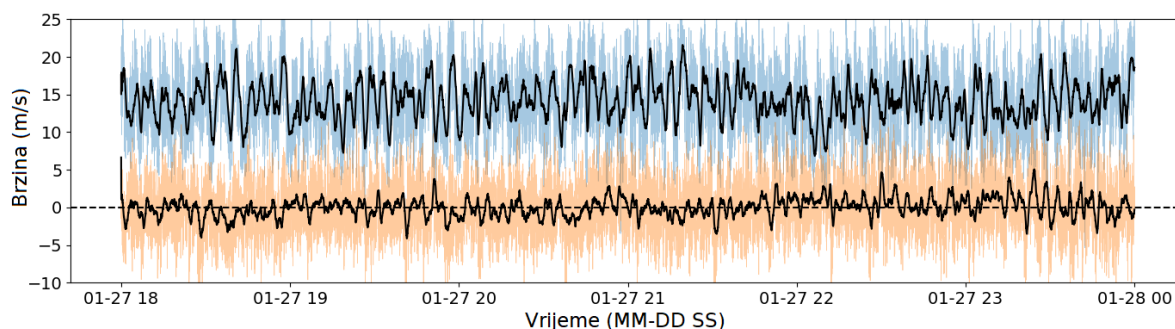
Značajnu poteškoću modeliranju turbulencije zavjetrinskih oluja predstavljaju parametrizacije AGS-a i prizemnog sloja atmosfere. Ove parametrizacije su u većini slučajeva baždarene na mjerenjima u idealiziranim, horizontalno homogenim uvjetima, što nije slučaj kod zavjetrinskih oluja. Neke klase parametrizacija, npr. lokalne sheme višeg reda zatvaranja (koje eksplicitno predviđaju TKE), su se pokazale točnijima od shema nižeg reda zatvaranja (Muñoz-Esparza i sur. 2016). Duljinske skale turbulencije potrebne za parametrizaciju turbulentnih tokova su često potcijenjene u brdovitom terenu (Grisogono i Belušić 2009; Večenaj i sur. 2010; Večenaj 2015), što može dovesti do potcjenjivanja površinskog trenja (pa stoga i prevelike brzine vjetra) i netočne pozicije zavjetrinskog rotora (npr. Muñoz-Esparza i sur. 2016). Većina ovih nepoznanica je uzrokovana nedostatkom mjerenja, posebice na visinama višim od nekoliko desetaka metara iznad tla. Od skupova podataka navedenih u Poglavlju 1.2, samo mjerenja u zaleđu Splita (projekt WINDEX) sadrže visokofrekventne podatke na većim visinama. Ovaj nedostatak je djelomično dopunjen avionskim (projekt MAP; Bougeault i sur. 2001), sodarskim (Stiperski i sur. 2012; Horvath i sur. 2010; 2013) i lidarskim (Jurković i sur.

2018) mjerenjima. Sukladno postoji potreba za mjerenjima srednje brzine i statističkih svojstava turbulencije bure, posebice na visinama iznad 20 m od tla. Korištenjem takvog skupa podataka može se provjeriti sposobnost numeričkog modela za simuliranje njihovih vertikalnih profila.

U siječnju 2012. godine, 100-m toranj s anemometrima na 5 razina iznad tla je postavljen u zaleđu Rijeke. Mjerni uređaji su osim usrednjene vrijednosti brzine i smjera vjetra mjerili i njihove standardne devijacije, što omogućava procjenu TKE i usporedbu s rezultatima numeričkog modela. U siječnju i veljači 2012. godine su mjerni uređaji na tornju zabilježili trojedni niz uzastopnih događaja jake do orkanske bure (vidi Kuzmić i sur. 2015). Analiza navedenog skupa podataka i usporedba s rezultatima numeričkog modela je cilj ove cjeline.

1.4 Submezoskalna gibanja i pulsacije

Jako smicanje unutar područja loma planinskog vala te između zaustavnog područja i NMS može uzrokovati sekundarne nestabilnosti (planinski val i NMS su primarno, kvazistacionarno mezoskalno gibanje). Jedna od sekundarnih nestabilnosti su tzv. pulsacije, kvaziperiodička gibanja perioda od 1 do 20 min, tj. valnih duljina od 1 do 10 km (primjer na Slici 1). Prva mjerenja potječu iz oluje u Boulderu, Colorado (Zipser i Bedard 1982). Neiman i sur. (1988) su lidarskim mjerenjima istražili gibanje struktura perioda 5 do 15 min koje su se gibale usrednjenom brzinom vjetra, a ostajale su koherentne i do 10 kilometara niz vjetar (njihova Slika 13). Kroz idealizirane i realistične 2D i 3D simulacije identificirana su tri uzroka pulsacija: Kelvin-Helholtozova nestabilnost (Scinocca i Peltier 1989; Peltier i Scinocca 1990), naginjanje osnovne vrtložnosti u području loma planinskog vala (Clark i Farley 1984; Clark i Hall 1994) i horizontalno propagirajući zavjetrinski valovi (Clark i Hall 1994). Shematski prikaz ovih uzroka je prikazan na Slici 3 (Poglavlje 3.2).



Slika 1: Primjer zapisa s izraženim pulsacijama (Senj, 2005. godina). Plavom (narančastom) bojom je prikazana longitudinalna (lateralna) komponenta brzine vjeta frekvencije uzorkovanja 4 Hz. Crnom bojom je prikazana 1-min klizna usrednjena vrijednost brzine vjeta.

Pulsacije su primijećene i u buri. Rakovec (1987) je na otoku Rabu piezoelektričnim anemometrom izmjerio pulsacije perioda 1,5 do 8 min, a Petkovšek (1987) predlaže katabatički model pulsiranja. Sljedeći iskorak se dogodio početkom 2000.-ih godina postavljanjem anemometara visoke frekvencije uzorkovanja (1 Hz) u gradu Senju. U nizu članaka Belušić i sur. (2004; 2007) otkrivaju da pulsacije izostaju kad pojava visinske mlazne struje spriječi lom planinskog vala te simulacijama modelom COAMPS identificiraju KHN kao najvjerojatniji uzrok pulsacija. Koristeći podatke 3D anemometra postavljenog u Senju 2004. godine, Orlić i sur. (2005) ukazuju na razliku između pulsacija i turbulencije, a Belušić i sur. (2006) proučavaju njihovo međudjelovanje. Horvath i sur. (2013) su u zaleđu Splita izmjerili pulsacije perioda 3 do 15 min i zaključili da su pulsacije duljeg perioda povezane s oscilacijama profila brzine vjeta i statičke stabilnosti u navjetrini planine.

Naglasak istraživanja i opisivanja pulsacija je prethodno bio njihov period, valna duljina i fazna brzina, kao i simulacija mezoskalnim numeričkim modelima. U ovoj cjelini namjeravam proučiti karakteristične strukture pulsacija u horizontalnoj ravnini koristeći metodu rotacijske spektralne analize (RSA; Gonella 1972; O'Brien i Pillsbury 1974). RSA promatra vremenski niz vektora brzine vjeta na određenoj frekvenciji, rastavljaajući ga na pozitivnu i negativnu rotacijsku komponentu (detaljan opis metode dan je u Poglavlju 4.3.3), te može pružiti uvid u svojstva poput prevladavajućeg smjera rotacije, oblika i koherentnosti rotacijske strukture (npr. pravocrtna, kružna ili eliptična) i njene orijentacije u horizontalnoj ravnini. RSA je na hrvatskoj obali korištena u proučavanju rotacijskih karakteristika zmorca (Prtenjak i sur. 2008) te vertikalnih rotacijskih karakteristika turbulencije i pulsacija (Orlić i sur. 2005). Odabir metode i cjeline je motiviran promatranjem velikog broja vremenskih zapisa s pulsacijama. Rotacijom podataka u sustav srednjeg prizemnog smjera vjeta se pokazalo da postoji znatna

promjenjivost udjela energije pulsacija u longitudinalnom (duž srednjeg vjetra) i lateralnom smjeru (okomito na srednji vjetar), čak i u okviru jednog događaja bure. Ova promjenjivost ukazuje na promjenu orijentacije ili strukture pulsacija. Cilj ove cjeline je opis horizontalnih rotacijskih značajki pulsacija u buri. Namjeravam provjeriti osjetljivost rotacijskih značajki na brzinu i smjera vjetra i sinoptički tip bure. Naposljetku, proučit ću sposobnost numeričkog modela WRF-ARW da pripadne značajke simulira i iskoristiti rezultate simulacije za proučavanje njihovih prostornih raspodjela. Ovo predstavlja prvi put da se RSA koristi za analizu horizontalnih rotacijskih značajki pulsacija bure.

2 CILJEVI I STRUKTURA RADA

Cilj prve cjeline je usporedba statističkih značajki turbulencije bure na dvjema bliskim postajama, jednoj u podnožju, a drugoj na grebenu planine, za opsežan skup događaja bure. Ovo predstavlja originalni doprinos rada. Odabrane postaje se nalaze u Senju i na prijevoju Vratnik, a na objema postajama je dostupan neprekinut skup podataka izmjeren anemometrima visoke frekvencije uzorkovanja. Nakon odabira primjerenog perioda usrednjavanja, izračunat će se statističke značajke poput TKE, ε , tokova količine gibanja, spektara snage i intenziteta turbulencije. Zbog razlika u površinskom pokrovu te visine postavljanja anemometara, statističke značajke će se usporediti s obzirom na teoriju sličnosti statički neutralnog prizemnog sloja atmosfere. Odstupanja bezdimenzijskih statističkih momenata i spektara od teorijskih vrijednosti ukazat će na moguće razlike u ravnoteži TKE na dvjema postajama.

U drugoj cjelini namjeravam proučiti sposobnost simulacije vertikalnih profila TKE numeričkim modelom WRF-ARW. Odabran skup podataka je izmjeren na 100-m tornju u zaleđu Rijeke s anemometrima na pet visina (25 m, 50 m, 75 m, 98 m i 100 m iznad tla). Ovo predstavlja dosad najviša neprekidna toranjska mjerenja brzine vjetera i turbulencije bure u prizemnom sloju atmosfere. Procjena TKE na tornju je omogućena činjenicom da su anemometri, osim standardnih 10-min usrednjenih vrijednosti horizontalne brzine i smjera vjetera, također mjerili i njihove standarne devijacije. Tijekom siječnja i veljače 2012. godine, mjerni uređaji na tornju su zabilježili iznimno dug, trotjedni niz događaja jake do orkanske bure. Duljina zapisa omogućuje usporedbu cjelokupnog događaja, kao i tijekom prelaska iz plitku u duboku buru. Zbog osjetljivosti bure o reljefu, korak numeričke mreže i model reljefa su bitni parametri numeričkog modela (npr. Liu i sur. 2020).

U posljednoj cjelini proučavam horizontalne rotacijske značajke pulsacija bure koristeći metodu RSA. Uspoređujem dobivene značajke, poput strukture gibanja i njihove orijentacije, sa strukturama koje su očekivane za dosad predložene uzroke nastanka pulsacija. Proučavam ovisnost značajki o parametrima poput usrednjene vrijednosti brzine vjetera ili sinoptičkog tipa bure. Nadalje, proučavam sposobnost numeričkog modela (WRF-ARW) da ove značajke simulira. Rezultate numeričkog modela koristim za stjecanje uvida u njihove prostorne i vremenske raspodjele. Naposljetku, predlažem nekoliko hipoteza za opažanja koja nisam mogao do kraja objasniti.

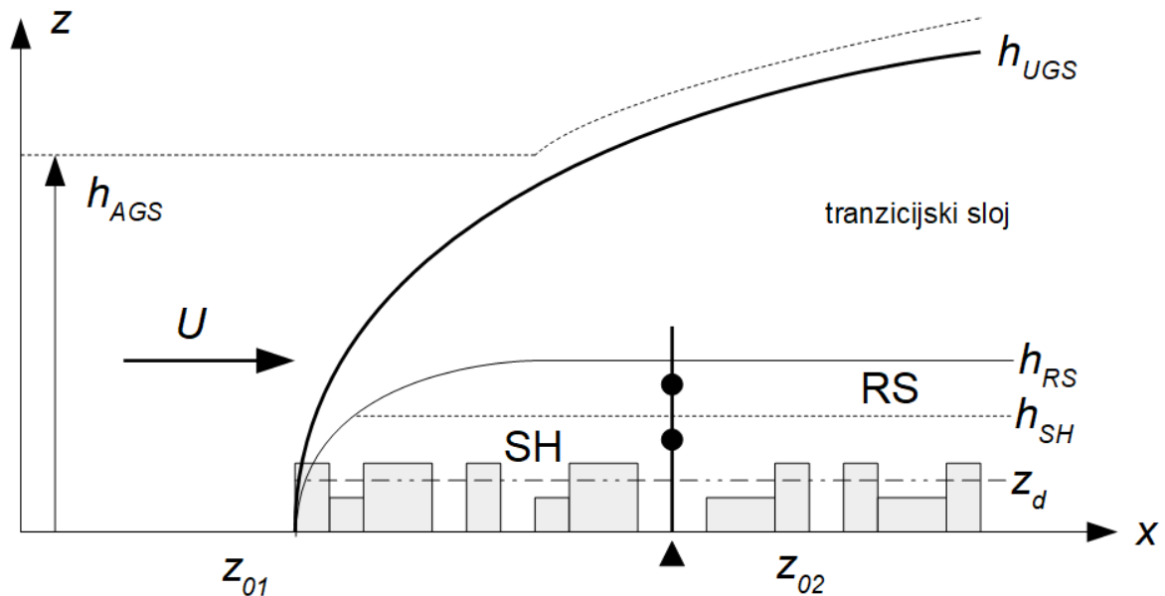
Ostatak rada strukturiran je na sljedeći način. Poglavlje 3 sadrži teorijske osnove, od čega 3.1 izlaže alate potrebne za usporedbu statističkih značajki turbulencije na dvjema postajama, a 3.2 opisuje dosad predložene uzroke pulsacija u zavjetrinskim olujama. Poglavlje 4 sadrži opis mjernih uređaja i skupova podataka u Senju i na Vratniku te u zaleđu Rijeke (Poglavlja 4.1 i 4.2), kao i metode koje se koriste u analizi podataka (Poglavlje 4.3). Poglavlje 5 sastoji se od tri dijela te uključuje prikaz i diskusiju rezultata, kao i osvrt za svaku od triju cjelina. Dijelovi ovog poglavlja mogu se stoga čitati zasebno, a poredak izlaganja rezultata isti je kao u gore navedenom izlaganju ciljeva. Zaključci su ukratko ponovljeni u Poglavlju 6. Prilozi su neobavezni, ali se mogu naći nakon Poglavlja 6.

3 TEORIJSKE OSNOVE

3.1 Turbulencija bure u prizemnom sloju atmosfere

Atmosferski granični sloj (AGS) je dio atmosfere neposredno iznad podloge (tla ili vodene površine). Sastoji se od nekoliko dijelova (Slika 2), a glavno obilježje mu je izražena turbulencija. Prizemni sloj (PS) je donji dio AGS-a preko kojeg se odvija izmjena turbulentnih tokova između podloge i gornjih dijelova AGS-a. Zauzima približno 10% ukupne visine AGS-a, a zbog približne konstantnosti vertikalnih turbulentnih tokova često se naziva i tzv. slojem konstantnih tokova. Općenitije, PS je dio atmosfere u kojem su statističke značajke turbulentnih vrtloga obilježene udaljenošću od podloge (z). Klasičan PS pretpostavlja stacionarnu, horizontalno homogenu turbulenciju čije se statističke značajke mijenjaju samo u vertikalnom smjeru. U pravilu je vrlo dobro opisan teorijama sličnosti poput MOST-a ili sličnosti miješanog sloja (npr. Stull 1988, od sada nadalje S88; Kaimal i Finnigan 1994, od sada nadalje KF94; Wyngaard 2010). Uslijed promjene površinskih svojstava poput hrapavosti podloge (npr. prijelaz s kamenjara na urbanu površinu) ili površinske temperature, te u blizini hrapave površine (tj. na visini iznad tla približno jednakoj visini elemenata hrapavosti z_H), moguća su odstupanja od uobičajenog PS-a.

Shematski prikaz AGS-a je dan na Slici 2. Promjene u svojstvima površine potiču zadebljanje unutarnjeg graničnog sloja (UGS) niz vjetar. Gornji dio UGS-a je prijelazni sloj u kojem je turbulencija obilježena značajkama nove površine, ali su još uvijek prisutna svojstva prethodne površine. U donjem dijelu UGS-a je sloj ravnoteže (RS) u kojem je turbulencija usklađena s novom površinom. Ako visina elemenata hrapavosti z_H nije zanemariva (npr. neposredno iznad pošumljenih površina ili urbanih sredina poput okoliša tornjeva u Senju i na Vratniku), tada najniži dio UGS-a poprima značajke sloja hrapavosti (SH). U SH, pretpostavke poput horizontalne homogenosti su upitne zbog nehomogene raspodjele izvora količine gibanja i topline (npr. osunčano i zasjenjeno tlo; Roth 2000, od sada nadalje R00; KF94). Ovi utjecaji opadaju kako SH prelazi u RS, no ako je vrijednost z_H visoka, tada je potrebna značajna duljina naleta (engl. *fetch*) da se RS izdigne iznad SH. Kako će biti pokazano u Poglavlju 5.1.2, navedeni utjecaji su izraženi na objema mjernim postajama.



Slika 2: Shematski prikaz AGS-a pri promjeni aerodinamičke duljine hrapavosti površine (z_0). Usrednjena brzina vjetra je U . Visine sloja hrapavosti (SH), ravnotežnog sloja (RS) i unutarnjeg graničnog sloja (UGS) su označene koristeći, redom, h_{SH} , h_{RS} i h_{UGS} . Toranj je označen trokutom.

Turbulencija u PS-u (i AGS-u) je opisana jednadžbom ravnoteže TKE (npr. KF94) koja predstavlja ravnotežu procesa koji u AGS-u proizvode ili guše TKE. Pri korištenju točkastih mjerenja (poput tornjeva s mjernim uređajima na jednoj ili više razina iznad tla) se često koristi pojednostavljena inačica jednadžbe TKE:

$$\underbrace{\frac{\partial \bar{e}}{\partial t}}_I = - \underbrace{\left(\overline{uw} \frac{\partial \bar{U}}{\partial z} + \overline{vw} \frac{\partial \bar{V}}{\partial z} \right)}_{II} - \underbrace{g \frac{\overline{w\theta_v}}{\theta_v}}_{III} - \underbrace{\frac{\partial \overline{we}}{\partial z}}_{IV} - \underbrace{\frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial \overline{p'w}}{\partial z}}_V - \underbrace{\frac{\varepsilon}{\bar{\rho}}}_{VI} + \underbrace{\frac{R}{\bar{\rho}}}_{VII}. \quad (3.1)$$

Članovi jednadžbe (3.1) opisuju (I) lokalnu promjenu TKE, (II) smičnu proizvodnju TKE, (III) uzgonski član, (IV) turbulentni transport TKE (TT), (V) turbulentni transport tlakom, (VI) viskoznu disipaciju TKE i (VII) rezidual (R) potreban za postizanje ravnoteže s obzirom na horizontalne nehomogenosti prisutne iznad brdovitog terena (Babić 2013; Šoljan i sur. 2018).

Doprinos pojedinih članova jednadžbe (3.1) je određen dominantnim procesima u pojedinim dijelovima AGS-a. Ovisno o dominantnim procesima, vertikalni profili i iznosi statističkih značajki pokazuju slično ponašanje, pa se svode na bezdimenzijske krivulje i vrijednosti koje su jednake u svim situacijama gdje su isti procesi prisutni u jednakim omjerima. Ovo predstavlja temelj teorije sličnosti te omogućuje usporedbu podataka izmjerenih na postajama

znatno različitih značajki površine, visine postavljanja mjernog uređaja itd. Različite bezdimenzijske grupe odgovaraju različitim ravnotežama procesa, pa odstupanja statističkih značajki ili profila od očekivanih vrijednosti ukazuju na odstupanja od pretpostavljene ravnoteže TKE.

Kako bi se podaci na dvjema postajama mogli uspoređivati, potrebno je utvrditi jedinstveno skaliranje, tj. dominantne procese zajedničke objema postajama. Istraživanja turbulencije bure su pokazala da je uzgonski član (III) zbog velike brzine vjetra u pravilu zanemariv (npr. Lepri i sur. 2017). Od ostalih članova, smična proizvodnja (II) i viskozna disipacija TKE (VI) predstavljaju važne članove, ali je pokazano da rezidual i TT također nisu zanemarivi (Babić 2013; Lisac 2014; Šoljan i sur. 2018; Večenaj i sur. 2021). Mjerenjima na različitim mjernim mjestima i u različitim godišnjim dobima dosad nije u potpunosti utvrđen točan doprinos ovih dvaju članova ukupnoj ravnoteži TKE (npr. Babić 2013; Večenaj i sur. 2021). MOST stoga često nije primjenjiv, osim za gradijent usrednjene brzine vjetra ili varijancu vertikalne brzine. Zbog svega navedenog, jedinstveno skaliranje za buru još nije pronađeno, uglavnom zbog izraženog utjecaja reljefa na značajke turbulencije bure.

Iako općenito skaliranje za buru ne postoji, za usporedbu podataka na dvjema postajama se koristi skaliranje statički neutralnog prizemnog sloja (NPS). Rasap tako skaliranih statističkih značajki ukazuje na odstupanje od statički neutralnog MOST modela. Okoliš obje postaje je obilježen elementima hrapavosti visine z_H usporedive s visinom mjernih uređaja (Poglavlje 4.1.2), pa je u analizi rezultata u obzir potrebno uzeti utjecaj SH. Sljedeća dva poglavlja (3.1.1 i 3.1.2) opisuju karakteristike statističkih značajki turbulencije u NPS-u i SH.

3.1.1 Sličnost statički neutralnog prizemnog sloja

Ravnoteža TKE u NPS-u se sastoji od smične proizvodnje i viskozne disipacije TKE (u jednadžbi 3.1 to su, redom, članovi II i IV). Karakteristična skala brzine turbulencije je brzina trenja

$$u_* = \sqrt[4]{\overline{uw}^2 + \overline{vw}^2}, \quad (3.2)$$

gdje su \overline{uw} i \overline{vw} , redom, vertikalni tokovi longitudinalne i lateralne količine gibanja. Longitudinalna os je definirana kao os paralelna smjeru usrednjenog vjetra, a lateralna os je u horizontalnoj ravnini i okomita na longitudinalnu os (npr. KF94). U horizontalno homogenom NPS-u, \overline{vw} je puno manji od \overline{uw} , ali iznad brdovitog terena zbog smicanja smjera vjetra mogu

biti istog reda veličine (Babić 2013). Vertikalni profil usrednjene vrijednosti longitudinalne komponente brzine je sukladan logaritamskom zakonu (npr. Thuillier i Lappe 1964)

$$U(z) = \frac{u_*}{k} \ln \frac{z - z_d}{z_0} = \frac{u_*}{k} \ln \frac{z'}{z_0}, \quad (3.3)$$

gdje je z_0 aerodinamička duljina hrapavosti podloge, z_d visina istisnuća (engl. *displacement height*), z' efektivna visina iznad z_d , a $k = 0.4$ je von Kármánova konstanta. Bezdimenzijske standardne devijacije komponenti brzine vjetra

$$\phi_{u,v,w} = \frac{\sigma_{u,v,w}}{u_*}, \quad (3.4)$$

ne ovise o visini iznad tla (vrijednosti $\phi_{u,v,w}$ su dane u Stull 1988). Viskozna disipacija TKE (ε) opada s visinom iznad tla te je

$$\phi_\varepsilon = \frac{kz'\varepsilon}{u_*^3} = 1. \quad (3.5)$$

Bezdimenzijski spektri snage komponenti brzine vjetra (skalirani s u_*) su funkcije bezdimenzijske frekvencije fz'/U (npr. Kaimal i sur. 1972), a valna duljina na kojoj spektri postižu maksimum (λ_{\max}) raste sa z' . Potpun popis vrijednosti i odnosa među bezdimenzijskim funkcijama u NPS-u nalazi se u npr. Stull (1988).

3.1.2 Odstupanja u sloju hrapavosti

U SH (ispod $2-5 z_H$) je ravnoteža NPS-a uvjetovana hrapavošću podloge. Kako univerzalna hrapava površina ne postoji, svojstva SH se često razmatraju kao odstupanja od NPS-a (R00). U jednadžbi ravnoteže TKE (jednažba 3.1) na važnosti dobivaju članovi advekcije i TT-a (član IV). Potonji je u donjem dijelu SH ($z/z_H < 1$) izvor, a u gornjem dijelu SH ponor TKE. ε je sukladno u gornjem dijelu SH manji od očekivane vrijednosti jer dijeli potrošnju TKE s TT-om, tj. $\phi_\varepsilon < 1$. Tokovi količine gibanja nisu konstantni s visinom (posebice ispod z_H), a blizu z_H K-teorija (KF94) više nije primjenjiva. Spektri snage komponenti brzine vjetra su također izmijenjeni. Dva prikladna izvora za usporedbu svojstava SH su R00 i KF94, pri čemu je R00 meta-analiza ~50 radova s mjerenjima u urbanom graničnom sloju, a KF94 opisuje promjene površinskog strujanja u vegetaciji. Ovdje su dana saznanja bitna za ovu cjelinu rada:

- Bezdimenzijske standardne devijacije komponenti brzine vjetra (tj. $\phi_{u,v,w}$) – KF94 pokazuje da su manje od očekivanih i približno jednake NPS vrijednostima tek pri $z/z_H \approx 2,5$; R00 ukazuje na veće rasipanje rezultata iznad hrapavih nego iznad glatkih površina.

- Bezdimenzijski spektri snage komponenti brzine vjetra – R00 i KF94 ukazuju na pomake vršnih frekvencija (n_{max}) prema nižim frekvencijama, tj. većim valnim duljinama (R00 samo za spektar vertikalne, a KF94 za spektre svih triju komponenti brzine); spektri konvergiraju prema krivuljama karakterističnim za NPS za $z/z_H > 1,5$ u slučaju horizontalnih te za $z/z_H > 2,5$ u slučaju vertikalne komponente brzine (KF94).
- KF94 ukazuje da se doprinos turbulentnog transporta (TT, član IV) ravnoteži TKE u SH ne može zanemariti.

Može se zaključiti da je SH iznad pošumljenih i urbanih površina vrlo sličan. Razlike između saznanja u R00 i KF94 se mogu pripisati činjenici da KF94 sadrži veći broj eksperimenata s mjerenjima ispod $z/z_H = 2$, dok su mjerenja u eksperimentima danim u R00 uglavnom bila provedena iznad $z/z_H = 2$.

Usporedba statističkih značajki u Senju i na Vratniku se provodi pristupima danim u Poglavljima 3.1.1 i 3.1.2. Uspoređujući bezdimenzijske veličine poput $\phi_{u,v,w}$ i bezdimenzijske spektre snage, tumače se razlike u TKE, ε i spektrima snage na dvjema mjernim postajama s obzirom na razlike u hrapavosti tla i visini mjernih uređaja.

3.2 Uzroci nastanka pulsacija

Poznata su tri uzroka nastanka pulsacija bure. Prvi je naginjanje osnovne vrtložnosti planinskog vala (nužno 3D proces; Clark i Farley 1984; Clark i Hall 1994), zatim KHN, tj. smično-uzgonska nestabilnost između NMS i zaustavnog područja (u biti 2D nestabilnost, mada se može prenijeti i u 3D; Scinocca i Peltier 1989; Peltier i Scinocca 1990; Belušić i sur. 2007) te horizontalno propagirajući zavjetrinski valovi (PZV od sada nadalje; Clark i Hall 1994). Shematski prikaz svih uzroka je dan na Slici 3.

Naginjanje osnovne vrtložnosti može se opisati jednadžbom vertikalne komponente relativne vrtložnosti (npr. Šinik i Grisogono 2009)

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = - \underbrace{\vec{v} \cdot \nabla \zeta}_I - \underbrace{\zeta \nabla \cdot \vec{v}}_{II} + \underbrace{(\vec{\omega} \cdot \nabla) w}_{III} - \underbrace{\hat{z} \cdot (\nabla \alpha \times \nabla p)}_{IV} + \underbrace{\hat{z} \cdot (\nabla \times (\alpha \vec{F}))}_V, \quad (3.6)$$

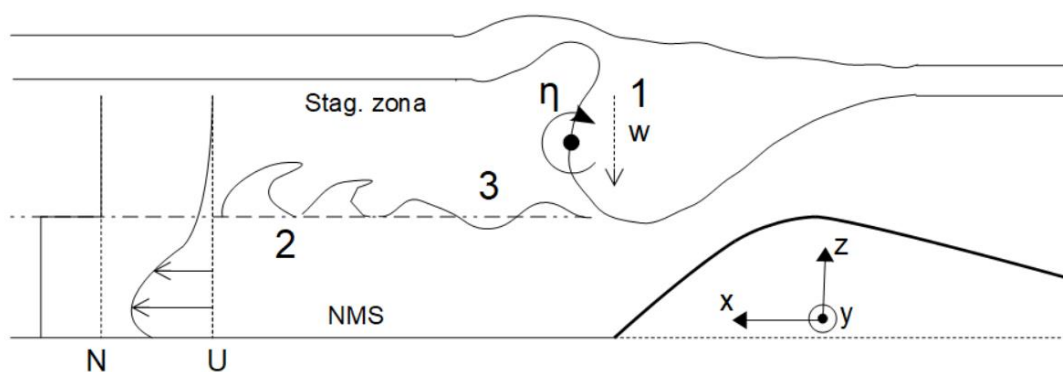
gdje je $\vec{\omega}$ vektor apsolutne vrtložnosti, ξ , η i ζ su, redom, x , y i z komponente $\vec{\omega}$, a p i α su, redom, tlak i specifična gustoća. Članovi desne strane jednadžbe (3.6) su

- I – advekcija vrtložnosti

- II – konvergencija/divergencija vrtložnosti,
- III – nagnjanje i rastezanje vrtložnosti,
- IV – baroklini član i
- V – nastanak vrtložnosti rotacijom sile trenja.

Član III predstavlja međudjelovanje gradijenta vertikalne brzine i vrtložnosti planinskog vala; na Slici 3 se svodi na $\eta \partial w / \partial y$, tj. nagnjanje η u ζ djelovanjem komponente gradijenta vertikalne brzine paralelne planini. Gradijent w je izazvan lokalnim lomom planinskog vala. Lokalno pojačana vertikalna brzina može transportirati novonastale horizontalno rotirajuće vrtloge do podloge, nakon čega ih usrednjeno strujanje advektira nizvodno (Clark i Farley 1984, njihova Slika 17). Ovi vrtlozi nemaju valni karakter (vrlo niska koherentnost) i kvazi-izotropni su u horizontalnoj ravnini (Clark i Hall 1994).

Pulsacije uzrokovane KHN te PZV nastaju u donjem dijelu lomećeg planinskog vala, između prizemne NMS i zaustavnog područja. Za nastanak KHN je nužan uvjet smicanje brzine vjetra koje prevlada statičku stabilnost (N) između dvaju slojeva, što se izražava Richardsonovim gradijentnim brojem (Ri ; za nastup KHN u paralelnom horizontalnom strujanju Ri treba biti manji od 0,25). Perturbacije brzine, tlaka i potencijalne temperature opadaju eksponencijalno s vertikalnom udaljenošću od diskontinuiteta u brzini vjetra i statičkoj stabilnosti. PZV nastaju zbog vremenski promjenjivog karaktera granice između NMS i zaustavnog područja (Clark i Hall 1994, Gossard i Hooke 1975), a razlikuju se od Kelvin-Helmholtzovih valova u tome da nisu nestabilni. U oba slučaja je gibanje česti zraka valnog karaktera te je sadržano u 2D vertikalnoj ravnini (za KHN ovo vrijedi sve do trenutka prelaska u 3D turbulenciju).



Slika 3: Shematski prikaz nastanka pulsacija bure. Broj 1 označava nagnjanje osnovne vrtložnosti planinskog vala (označene s η). Brojevi 2 i 3 označavaju KHN i PZV. N i U označavaju, redom, statičku stabilnost i brzinu vjetra.

4 PODACI I METODE

4.1 Mjerni uređaji i opis terena

4.1.1 Toranj u zaleđu Rijeke

Meteorološki toranj visine 100 m u zaleđu grada Rijeke je smješten na navjetrinskoj strani priobalnih planina, ali na zavjetrinskoj strani cjelokupnog planinskog lanca. Približna geografska širina i dužina su 45°N, 15°E, a podnožje tornja je na 625 m iznad srednje razine mora (s.r.m.). Toranj čelične mrežne konstrukcije je opremljen nizom mjernih uređaja na 8 m, 25 m, 50 m, 75 m, 98 m i 100 m iznad tla (Slika 4). Mjerni uređaji, mjerene veličine i visina postavljanja mjernih uređaja su dani u Tablici 1. Mjerni uređaji su uzorkovali podatke svake sekunde, ali su na kraju svakog 10-min perioda spremene samo statističke značajke poput usrednjenih vrijednosti i standardnih devijacija. Zapisivač podataka (engl. *data logger*) je Wilmers NDL 485 (Wilmers Messtechnik). Meteorološki toranj se nalazi u blizini vrha manjeg brda, na padini (nagib oko 10° u smjeru JZ–SI), a tlo je prekriveno gustom zimzelenom šumom visine stabala od nekoliko metara. Šuma je gušća prema JZ i SI, a prema SZ i JI tlo je pokriveno mjestimičnim gromadama promjera ~1 m.

Tablica 1: Popis mjernih uređaja, visina postavljanja te popis veličina sačuvanih na kraju svakog 10-min perioda. Usrednjena vrijednost neke varijable označena je s μ , a standardna devijacija sa σ .

| Visina iznad tla (m) | Mjerni uređaj | Naziv mjernog uređaja i proizvođač | Sačuvana veličina |
|----------------------|--------------------|------------------------------------|-------------------------------|
| 8 | Barometar | - | μ_p |
| | Termometar | - | μ_t |
| | Higrometar | - | μ_{rh}, σ_{rh} |
| 25, 50, 75, 98, 100 | Šalični anemometar | Thies 1 st class | $\mu_U, \sigma_U, \min, \max$ |
| | Vjetrovna | Thies Clima | $\mu_\theta, \sigma_\theta$ |



Slika 4: Toranj u zaleđu Rijeke s postavljenim mjernim uređajima. Mjerenje je provedeno od 1. siječnja 2012. do 29. veljače 2012. godine. Anemometri se nalaze na desnoj, a vjetrulje na lijevoj strani tornja.

4.1.2 Tornjevi u Senju i na Vratniku

Tornjevi s mjernim uređajima se nalaze u Senju i na prijevoju Vratnik (mjerni uređaji i tornjevi vlasništvo su Geofizičkog odsjeka PMF-a u Zagrebu). U Tablici 2 su dani detalji uključujući visinu postavljanja mjernih uređaja i geografsku poziciju tornjeva. Oba tornja su opremljena 3D ultrasoničnim anemometrom WindMaster (Gill Instruments). Frekvencija uzorkovanja je 4 Hz u Senju te 4 Hz i 1 Hz na Vratniku (zbog udara munje je 4-Hz mjerni uređaj u jednom trenutku zamijenjen uređajem frekvencije uzorkovanja 1 Hz; detalji u Poglavlju 4.2.2). Anemometrima su izmjerene komponente brzine vjetera bez sonične temperature ili vlažnosti, pa sukladno nisu dostupni podaci o tokovima senzibilne ili latentne topline za određivanje statičke stabilnosti prizemnog sloja atmosfere.

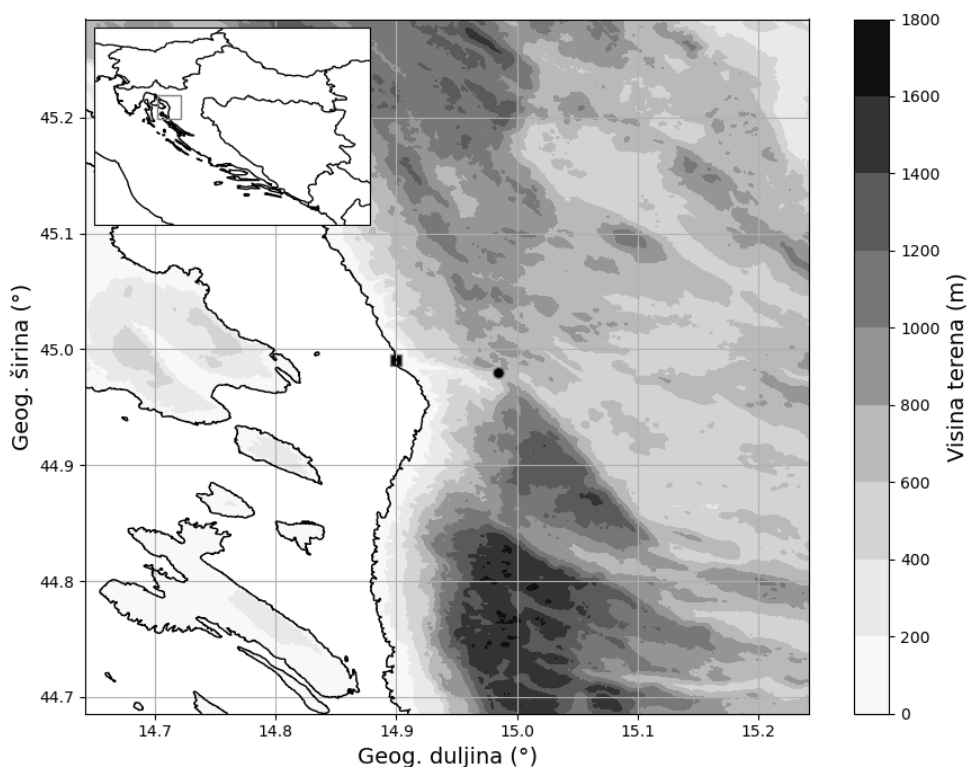
Tablica 2: Geografska lokacija tornjeva, visina terena i visina postavljanja mjernih uređaja.

| Postaja | Visina iznad s.r.m. (m) | Geografska lokacija | Visina mjernog uređaja iznad tla (m) |
|---------|----------------------------|---------------------|---|
| Senj | 2 | 44,99°N, 14,90°E | 13 |
| Vratnik | 698 | 14,98°N, 14,98°E | 9,5 |

Slika 5 prikazuje pozicije tornjeva. Na prijevoju Vratnik teren je okružen višim vrhovima na SZ (visina ~1000 m) i JI (visina 1200–1500 m). U smjeru SI se teren blago spušta, a prema JZ naglo obrušava prema obali, što predstavlja idealan teren za nastanak zavjetrinskih oluja. Senj se nalazi na obali mora, u podnožju strmog obronka. Gledajući prema SI, najviši vrhovi iznad Senja su visine ~800 m.

Važno je dati opis terena u neposrednom okružju tornjeva zbog njegovog utjecaja na značajke turbulencije (Poglavlje 3.1.2). Iz perspektive tornja na Vratniku, prvi kvadrant (smjer odakle bura puše, tj. azimut od 0° do 90°) je pokriven homogenom zimzelenom šumom. Visina stabala je 5 m, a udaljenost između stabala je 2–3 m. Prema JI teren se blago spušta i prekriven je kamenjem bez vegetacije, a prema zapadu se spušta u usjek. U Senju je mjerni uređaj postavljen na 3 m visok toranj na zgradi Lučke kapetanije visine 10 m. Prvi kvadrant pokriven je zgradama visine 2–4 kata (8–12 m), a udaljenost između zgrada je 3–8 m. Izgrađenost terena se smanjuje prema SI, a 600 m od tornja teren se uzdiže prema planinskom grebenu. Oko 230 m od tornja

se nalazi crkveni toranj visine ~30 m. Između Lučke kapetanije i prvog reda zgrada se nalaze parkiralište i cesta ukupne širine 100–200 m.



Slika 5: Reljef oko tornjeva s mjernim uređajima u Senju (kvadrat) i na Vratniku (krug). Podaci su bilježeni od ožujka 2004. do lipnja 2006. godine (Senj) i od listopada 2004. do rujna 2005. godine (Vratnik).

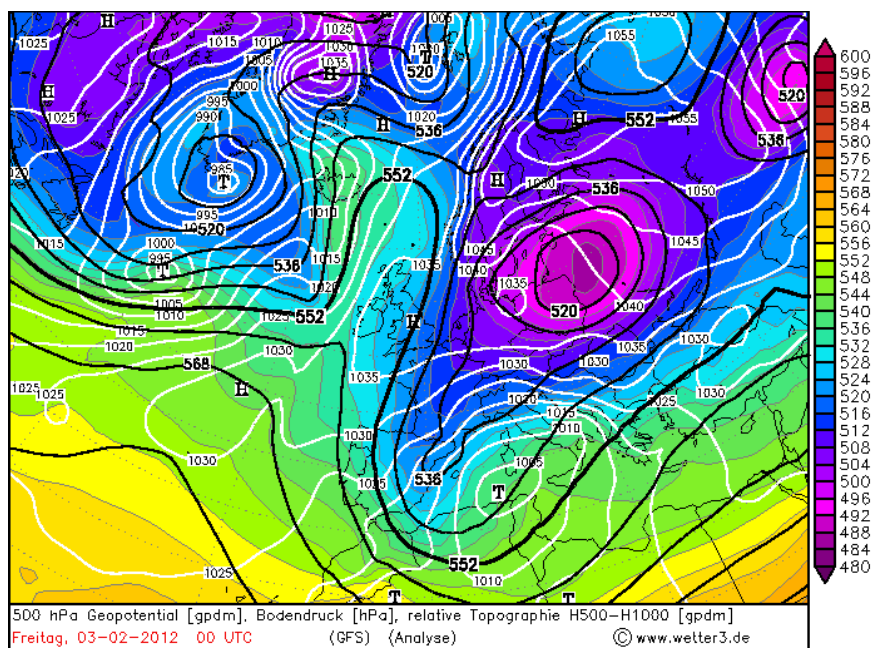
4.2 Opis skupova podataka

4.2.1 Toranj u zaleđu Rijeke

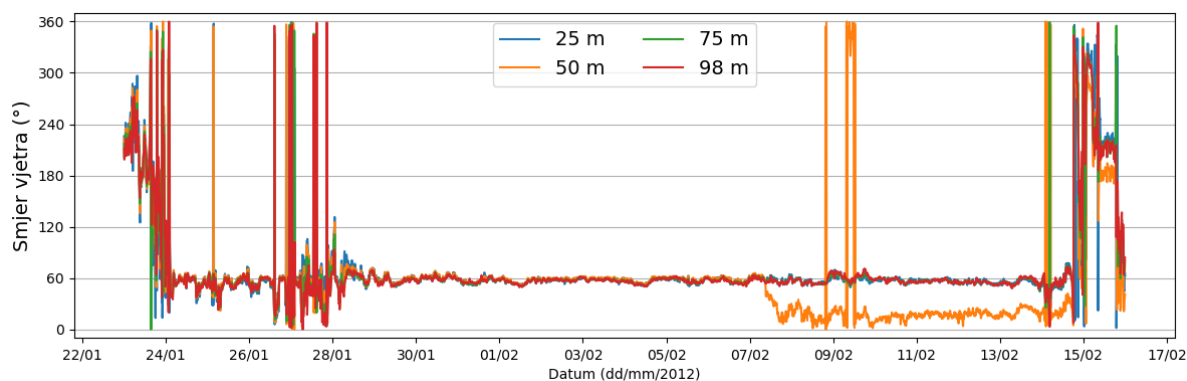
Mjernim uređajima na tornju su prikupljeni podaci od 1. siječnja do 29. veljače 2012. godine. Popis izmjerenih parametara i mjernih uređaja je dan u poglavlju 4.1.1 (Tablica 1). U periodu od 24. siječnja do 14. veljače, sjeverni Jadran je bio izložen nizu uzastopnih događaja jake bure u trajanju od gotovo 20 dana. Usrednjena brzina vjetra na visini 25 m za najjači (ujedno i najdulji) događaj bure je bila veća od 20 m s^{-1} (čak i do 25 m s^{-1} , tj. orkanska snaga). Ovo je jedan od najduljih i najjačih događaja bure koji su ikad zabilježeni na području Hrvatske (Kuzmić i sur. 2015). Događaj je povezan s dugotrajnom visinskom dolinom koja se protezala od obala Portugala do Norveškog mora (Slika 6). Bura je uglavnom bila uzrokovana intenzivnom ciklonom sa središtem iznad južnog Jadrana, Jonskog i Egejskog mora. Dvije takve ciklone su nastale alpskom ciklogenezom. Istovremeno je sibirski anticiklon omogućila dotok hladnog zraka sa sjeveroistoka. Sukladno rezultatima simulacije (Poglavljje 5.2) i

sondažama u Zagrebu i Zadru (npr. <https://weather.uwyo.edu/upperair/>; stranica Sveučilišta u Wyomingu, SAD), većinu vremena se na vrhu strujanja nalazila inverzija i kritična razina s jakim smicanjem smjera i brzine vjetra na visini 0,5–1 km iznad najviših planinskih vrhova. Ovo su idealni uvjeti za nastanak jake bure (Smith 1987; Klemp i Durran 1987; Grisogono i Belušić 2009; Kozmar i Grisogono 2021). U periodu od 7. do 9. veljače strujanje je nakratko sjeveroistočno do istočno (tj. duboko) kroz čitavu troposferu.

Poseban naglasak je na proučavanju podataka prikupljenih od 23. siječnja do 16. veljače 2012. godine. Pritom se koriste usrednjene vrijednosti i standardne devijacije brzine i smjera vjetra na 25 m, 50 m, 75 m, i 98 m iznad tla. Na visini od 50 m je zabilježeno značajno odstupanje u smjeru vjetra (Slika 7), tj. nakon 7. veljače je smjer vjetra odstupao i do 30°–40° u usporedbi sa smjerom na 25 m i 75 m. Ovo ukazuje na mogući kvar vjetrulje pa se μ_θ i σ_θ na 50 m nakon 7. veljače ne smatraju pouzdanima.



Slika 6: Geopotencijalna visina na 500-hPa plohi i tlak na srednjoj razini mora 3. veljače 2012. godine, 00 UTC. Slika je preuzeta s https://www.wetter3.de/archiv_gfs_dt.html.



Slika 7: Azimut smjera vjetra na tornju u zaleđu Rijeke na 25 m, 50 m, 75 m i 98 m iznad tla. Značajno odstupanje smjera nakon 7. veljače 2012. godine na 50 m je pokazatelj mogućeg kvara na vjetrulji.

4.2.2 Tornjevi u Senju i na Vratniku

Anemometrima u Senju i na Vratniku su bilježeni podaci od ožujka 2004. do lipnja 2006. godine (Senj) i od listopada 2004. do rujna 2005. godine (Vratnik). Koriste se podaci od listopada 2004. do početka travnja 2005. godine, nakon čega je zbog udara munje anemometar na Vratniku zamijenjen mjernim uređajem frekvencije uzorkovanja 1 Hz koja je nedovoljna za računanje viskozne disipacije. Izdvojeni su svi vremenski periodi u kojima je puhao vjetar azimuta između 30°N i 90°N u trajanju od minimalno 3 h. Za detaljnu analizu su odabrani periodi u kojima je bura puhala istovremeno na objema postajama. Navedeni periodi su zatim podijeljeni na podperiode duljine 6 h. Ovo je napravljeno jer se vremenska skala τ koja odvaja turbulenciju od (sub)mezoskalnih gibanja određuje prema (ko)spektrima komponenti brzine vjetra (Poglavlje 4.3.1). Kako bi (ko)spektri bili dovoljno široki da se na njima može odrediti spektralni procjep između mikro- i mezoskale, a da vremenski niz na kojem se računaju bude stacionaran, odabran je period od 6 h.

Odabrani su samo 6-h podperiodi čija je usrednjena vrijednosti brzine vjetra veća od 5 m s^{-1} , tj. ukupno 240 podperioda. Granična vrijednost je odabrana jer je prethodno pokazano da se vjetar brzine manje od 5 m s^{-1} ne može smatrati burom (Lepri 2023). Za brzine vjetra veće od 5 m s^{-1} je prizemni sloj približno neutralne statičke stabilnosti, posebice bliže površini tla gdje je smicanje vjetra najveće (npr. Grisogono i Belušić 2009; Lepri i sur. 2015).

4.3 Metode

4.3.1 Određivanje perioda usrednjavanja

Kako bi statističke značajke turbulencije (TKE, ε , itd.) izračunate u vremenskoj domeni konvergirale prema ansambl vrijednostima važno je

- Odrediti prikladnu vremensku skalu τ koja odvaja mikroskalna gibanja od (sub)mezoskalnih te
- Ispitati stacionarnost turbulencije na periodu odabranom za analizu.

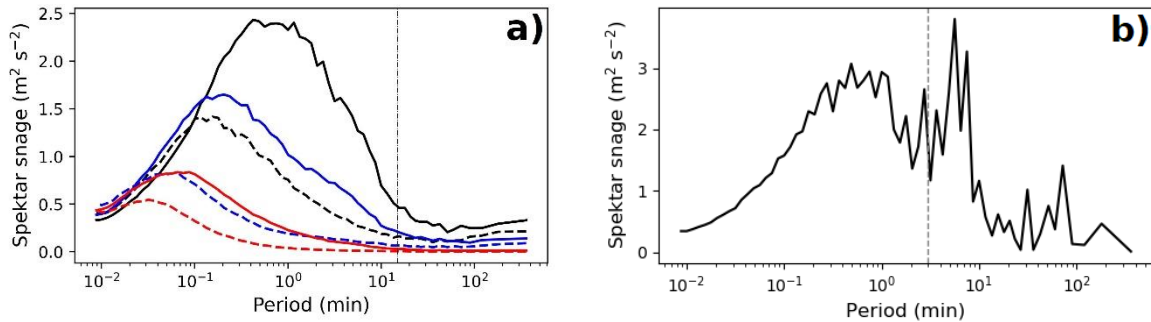
Postoji nekoliko načina određivanja τ (npr. Oncley i sur. 1966; Vickers i Mahrt 2003). Jedan od najkorištenijih je tzv. metoda spektralnog procjepa (npr. Metzger i Holmes 2008) gdje se odredi raspon frekvencija na kojem spektri i/ili kospektri komponenti brzine vjetra imaju malu amplitudu, a koji se nalazi u tzv. mezoskalnom procjepu (između vremenskih skala od nekoliko minuta do nekoliko sati, npr. S88). U slučaju bure određivanje jedinstvene skale τ može biti zahtjevnije jer se submezoskalna gibanja poput pulsacija (perioda od 1–20 min) mogu u frekventnom prostoru preklapati s mikroskalnim dijelom spektra. Ako se takva gibanja ne smatraju turbulencijom, tada odabir prevelikog τ može povećati TKE, tokove količine gibanja i druge fizikalne veličine koje ovise o odabiru τ . Belušić i sur. (2006) i Večenaj (2012) su procijenili da za τ veći od 10 min, TKE može u prisutnosti pulsacija biti precijenjena i do 30%.

Zbog svega navedenog, τ je određen na dva načina. U prvom, τ je konstantan i jednak 15 min (na obje postaje), a odabran je na temelju širokog spektralnog procjepa na kompozitnom spektru svih 6-h podperioda (Slika 8a). Ova skala je zatim primijenjena na svih 240 6-h podperioda, što znači da statističke značajke izračunate primjenom ovog τ sadrže submezoskalne doprinose. U drugom pristupu nisu korišteni svi 6-h podperiodi, već samo oni:

- na kojima se može odrediti spektralni procjep između mikroskalnog i submezoskalnog dijela spektra (primjer na Slici 8b) ili
- na kojima nema značajnih submezoskalnih doprinosa.

Vremenska skala τ se zatim određuje zasebno za svaki podperiod, što znači da τ nije jednak za svaki podperiod i postaju. Ovaj način računanja statističkih značajki turbulencije omogućuje odvajanje submezoskalnih doprinosa i usporedbu sa značajkama izračunatim uz korištenje konstantnog τ . Od 240 6-h podperioda, približno 100 u Senju te gotovo svi na Vratniku zadovoljavaju gore navedene uvjete (na Vratniku su submezoskalni doprinosi, tj. pulsacije, rijetki). Koriste se samo 6-h podperiodi koji istodobno zadovoljavaju oba uvjeta na objema postajama, što znači da je skup statističkih značajki manji u odnosu na prvi slučaj (~100 6-h

podperioda). Treba napomenuti da su ovim pristupom izuzeti slučajevi s vrlo kratkim pulsacijama (perioda ~ 1 min) gdje odvajanje turbulencije od submezoskalnih pojava nije moguće.



Slika 8: (a) Medijani frekvencijom otežanih spektara snage komponenti brzine vjetra. Crnom bojom su prikazani spektri longitudinalne (u), plavom lateralne (v), a crvenom vertikalne (w) komponente brzine. Pune (isprekidane) linije su spektri iz Senja (na Vratniku). Vertikalna isprekidana linija predstavlja period od 15 min. Prije izračuna spektara svaki 6-h period rotiran je u sustav usrednjenog vjetra, tako da \bar{v} i \bar{w} za čitav period iščezavaju. **(b)** primjer 6-h perioda (Senj) na kojem je moguće odrediti spektralni procjep između mikroskalnog i submezoskalnog dijela spektra. Prikazan je spektar longitudinalne komponente brzine. Vertikalna isprekidana linija predstavlja period od 3 min.

Nakon što je τ određen, svaki 6-h podperiod je podijeljen na dijelove trajanja $T = 1$ h na kojima se statističke značajke računaju. T je proizvoljne duljine, ali je važno da je nekoliko puta veći od τ kako bi statističke značajke konvergirale prema ansambl vrijednostima (Lenschow i sur. 1994). Vremenski nizovi komponenti brzine vjetra u svakom periodu duljine T su zatim rotirani u sustav usrednjenog vjetra korištenjem dvostruke rotacije (KF94). Svaka komponenta je zatim razdvojena na niskofrekventni dio i fluktuaciju

$$\tilde{u}_k = \bar{U}_k + u_k, \quad (4.1)$$

gdje je \tilde{u}_k originalni vremenski niz k -te komponente brzine vjetra, u_k predstavlja \tilde{u}_k filtriran visokopropusnim filterom granične frekvencije $1/\tau$, a \bar{U}_k je niskofrekventni ostatak.

Na svakom periodu duljine T su zatim izračunate usrednjene vrijednosti longitudinalne brzine vjetra U (jednaka \bar{U}_k usrednjenom na 1-h periodu), viskozna disipacija TKE (ε ; Poglavlje 4.3.2), komponente Reynoldsovog smičnog tenzora

$$R_{kl} = \overline{u_k u_l} = \int_{t_0}^{t_0+T} u_k(t) u_l(t) dt, \quad (4.2)$$

(gdje su $k, l = 1, 2, 3$) te dodatne statističke značajke izvedene iz navedenih veličina (npr. intenzitet turbulencije). Kako bi se ispitala stacionarnost turbulencije na periodu duljine T (drugi uvjet konvergencije), provedena su dva ispita stacionarnosti:

- tzv. *Reverse arrangement test* (RAT; Bendat i Piersol 1986) – prikladan za ispitivanje monotonih trendova i
- ispit normalnosti (Mahrt 1998; od sada nadalje M98) – prikladan za ispitivanje isprekidanosti (eng. *intermittency*).

Ako statistička značajka na periodu trajanja T zadovoljava oba uvjeta, onda se period smatra stacionarnim s obzirom na značajku. U nastavku je uvjet stacionarnosti primijenjen selektivno, tj. samo značajke uključene u određeni izraz ili dijagram trebaju biti stacionarne. Na primjer, ako je prikazan odnos TKE i U , onda sve tri varijance komponenti brzine i U trebaju biti stacionarne. Najstroži uvjet, u kojem se zadržavaju samo periodi T u kojima sve fizikalne veličine zadovoljavaju uvjet stacionarnosti (Večenaj i De Wekker 2015), smanjuje skup podataka na oko 20% prvotne veličine, ali se čak i u tom slučaju rezultati i zaključci značajno ne mijenjaju.

4.3.2 Procjena viskozne disipacije

Izravno mjerenje viskozne disipacije TKE (ε) zbog malih dimenzija disipativnih vrtloga nije moguće primjenom ultrasoničnih anemometara (npr. Wyngaard 2010). Zbog toga postoji niz neizravnih metoda koje se oslanjaju na izotropnost turbulencije ili inercijski spektralni nagib od $-5/3$ (Kolmogorov 1941), a koje se mogu koristiti s podacima niže frekvencije uzorkovanja. Za računanje ε je odabrana inercijsko-disipacijska metoda (IDM; npr. Tennekes i Lumley 1972). Metoda je prethodno korištena za računanje ε bure (npr. Večenaj i sur. 2012; Večenaj 2012), iako još nije u potpunosti ispitano koja od indirektnih metoda je najprimjerenija (Večenaj i sur. 2007).

Prema IDM, ako je zadovoljena Taylorova hipoteza tzv. „zamrznute turbulencije“ (npr. Stull 1988), tj.

$$\frac{\sigma_M}{M} < 0.5 \quad (4.3)$$

gdje su M i σ_M , redom, usrednjena vrijednost i standardna devijacija brzine vjetra, onda se unutar inercijskog raspona frekvencija može koristiti izraz (npr. Wyngaard 2010)

$$\varepsilon = \frac{2\pi}{U} \left(\frac{f^{5/3} S_u(f)}{\alpha} \right)^{3/2}, \quad (4.4)$$

gdje je $\alpha = 0,53$ Kolmogorovljeva konstanta, a $\overline{f^{5/3}S_u(f)}$ je tzv. kompenzirani spektar usrednjen u određenom rasponu frekvencija. Sukladno Kolmogorovljevoj teoriji, inercijski raspon zadovoljava sljedeće uvjete (npr. Batchelor 1959):

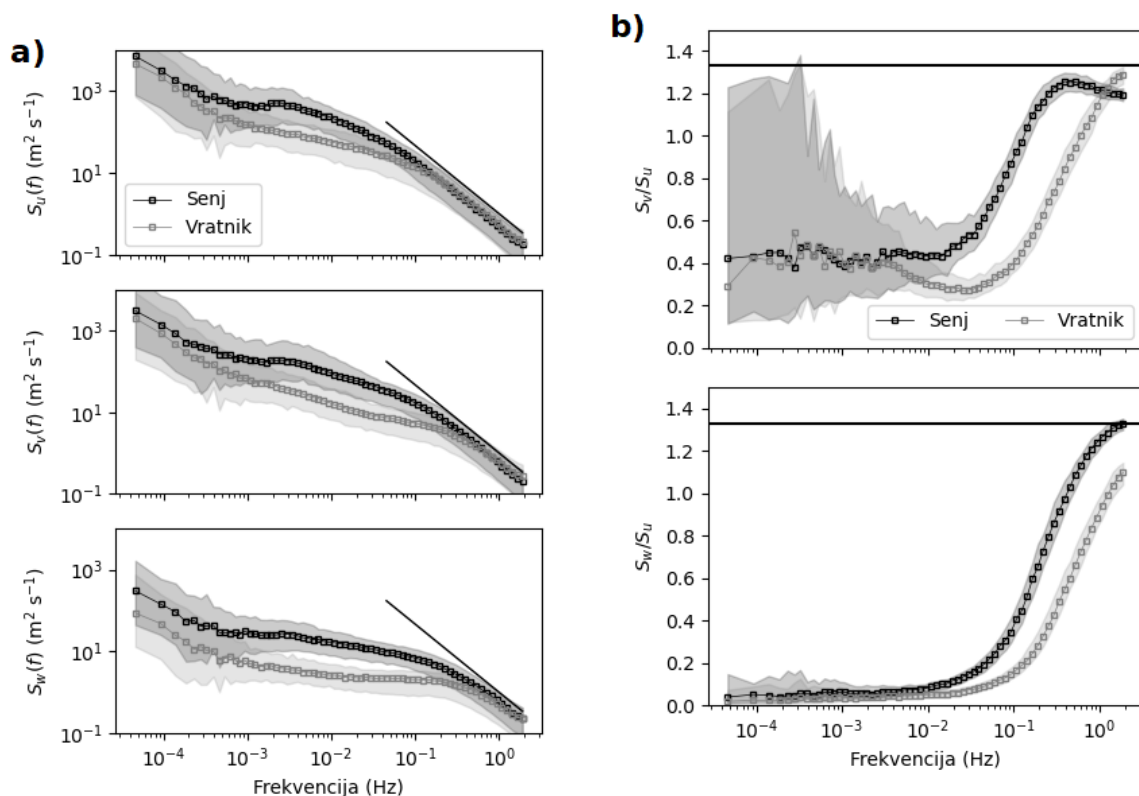
- Nagib od $-5/3$ u logaritamskom prikazu (što porazumijeva da je u inercijskom rasponu kompenzirani spektar približno konstantan) i
- Omjer od $4/3$ između spektara gustoće snage lateralne i longitudinalne (S_v/S_u) te vertikalne i longitudinalne (S_w/S_u) komponente brzine vjetra.

Ova dva pokazatelja nisu nužno prisutna u istom rasponu frekvencija. Naime, postoje dokazi za atmosferske spektre čiji se nagib od $-5/3$ proteže izvan raspona frekvencija unutar kojih je postignut omjer $4/3$ (npr. Champagne 1978; Mestayer 1982). Štoviše, postoje naznake da u nekim slučajevima izotropnost nije postignuta ni na najmanjim prostornim skalama (npr. Wyngaard 2010).

Ova „ne-simultanost“ značajki inercijskog raspona se može vidjeti i na spektrima komponenti brzine vjetra u Senju i na Vratniku (Slika 9). Omjer od $4/3$ postignut je u Senju (0,4 Hz za S_v/S_u te 2 Hz za S_w/S_u), ali ne i na Vratniku, gdje samo S_v/S_u dostiže omjer od $4/3$ (Slika 9b). Istovremeno, spektralni nagib od $-5/3$ je prisutan za sve tri komponente brzine, i to na frekvencijama izvan područja u kojemu je postignut omjer $4/3$ (Slika 9a). Dakle, strogo izotropan inercijski raspon nije dostignut, ali se jednadžba (4.4) ipak može koristiti jer se nagib od $-5/3$ proteže i izvan navedenog područja. Zbog toga će kompenzirani spektar izračunat na frekvencijama unutar strogo inercijskog raspona i malo izvan njega (a kojima se može pristupiti) biti jednak i konstantan. Na primjer, Piper i Lundquist (2004) su izračunali ε unutar sinoptičke frontalne zone koristeći IDM (sonični anemometar, frekvencija uzorkovanja 10 Hz) i izravnu metodu koja je koristila podatke izmjerene anemometrom na vruću žicu (frekvencija uzorkovanja od 10 kHz). Potonji zbog svoje iznimno visoke frekvencije uzorkovanja može razlučiti disipativne vrtloge pa se vrijednost ε izračunata ovim instrumentom smatra točnijom. Iako soničnim anemometrom omjer od $4/3$ nije dostignut (dakle strogo izotropan inercijski raspon nije ostvaren), dvije vrijednosti ε ipak su bile jednake. Prema tome, izgleda da stroga izotropnost nije nužna za korištenje IDM, već samo $-5/3$ nagib.

Na svakom periodu duljine T je ε izračunat koristeći (4.4) i kompenzirani spektar snage longitudinalne komponente brzine ($f^{5/3}S_u$). Potonji je usrednjen u rasponu frekvencija od 0,3

do 2 Hz; na ovom rasponu frekvencija su kompenzirani spektri najbliži konstantnoj vrijednosti (nije prikazano).



Slika 9: (a) Logaritamski prikaz spektara longitudinalne (gore), lateralne (sredina) i vertikalne (dolje) brzine; crni pravac označava nagib $-5/3$. (b) omjeri spektara lateralne i longitudinalne te vertikalne i longitudinalne brzine. Kvadrati označavaju medijan, a sjenčanje interkvartilni raspon. Horizontalna linija označava omjer $4/3$.

4.3.3 Rotacijska spektralna analiza

Rotacijska spektralna analiza (RSA; npr. Gonella 1972; O'Brien i Pillsbury 1974) je primijenjena s ciljem proučavanja rotacijskih značajki pulsacija u horizontalnoj ravnini. Koncept metode je jednostavan, horizontalno gibanje se rastavlja na zbroj pozitivno (suprotno smjeru kazaljke na satu) i negativno (u smjeru kazaljke na satu) rotirajućeg gibanja

$$F(\omega) = w_+(\omega)e^{i\omega t} + w_-(\omega)e^{-i\omega t}, \quad (4.5)$$

gdje je $w = u + iv$, u i v su zonalna i meridionalna komponenta brzine vjetra, i je imaginarna jedinica, $F(\omega)$ je Fourierov transformat od w , a w_+ (w_-) je kompleksna amplituda pozitivno (negativno) rotirajuće komponente gibanja na kružnoj frekvenciji ω . Ako se spektri gustoće snage pozitivno i negativno polariziranog gibanja označe sa $S_{\pm} = |w_{\pm}|^2$, gibanje na određenoj

frekvenciji se može se opisati korištenjem nekolicine parametara, npr. omjera poluosi elipse R_{ab} , stabilnosti gibanja E i orijentacije velike poluosi elipse α

$$R_{ab} = \frac{\sqrt{S_+} - \sqrt{S_-}}{\sqrt{S_+} + \sqrt{S_-}}, \quad (4.6)$$

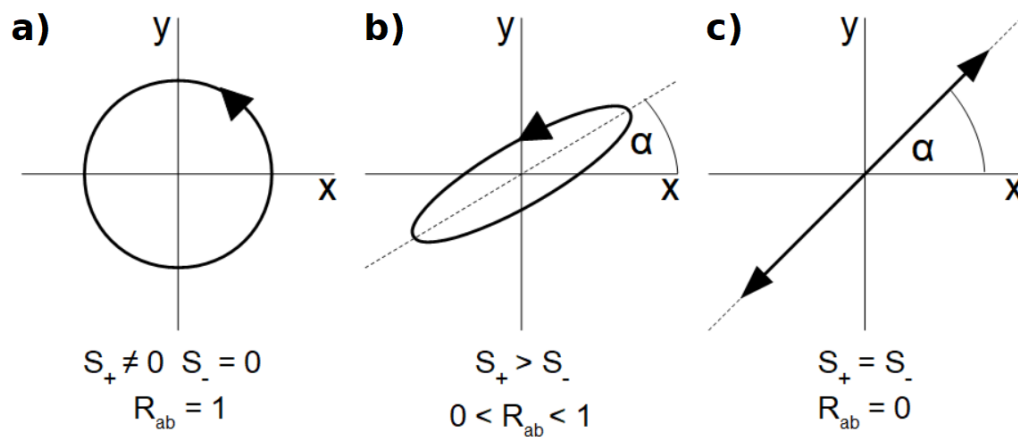
$$E^\dagger = E e^{i2\alpha} = \frac{w_+ w_-^*}{\sqrt{S_+ S_-}}, \quad (4.7)$$

gdje su E i α amplituda i polufaza kompleksne stabilnosti E^\dagger . Tumačenje ovih parametara je sljedeće:

- R_{ab} – gibanje na nekoj frekvenciji može biti duž pravca (pravocrtno), eliptično ili kružno ovisno o odnosu S_+ i S_- . Vrijednost varira između -1 i 1 gdje nula označava pravocrtno gibanje (tj. S_+ i S_- su jednaki), a 1 i -1 označavaju pozitivno i negativno kružno gibanje.
- α – kut između velike osi elipse i osi apscise. Može se tumačiti kao os duž koje česti zraka osciliraju (ako je gibanje potpuno kružno os nije definirana).
- E – kružni analogon linearne koherentnosti. Vrijednost varira između 0 i 1; što je vrijednost veća to je gibanje stabilnije u smislu da se orijentacija i ekscentricitet elipse ne mijenjaju u vremenu.

Slika 10 opisuje gibanja koja odgovaraju nekim vrijednostima navedenih parametara.

Iako su spektri gustoće snage rotacijskih komponenti (S_\pm) i parametri (jednadžbe 4.6–7) zadani pomoću w_\pm , oni se u praksi tako ne računaju. Umjesto toga se mogu zadati pomoću linearnih spektara gustoće snage komponenti brzine vjetera (S_u i S_v), njihovog kospektra (S_{uv}) i spektra kvadrature (Q_{uv}). Prema tome, S_u , S_v , S_{uv} i Q_{uv} se izračunaju uobičajenom metodom, npr. (Welch 1967), ili usrednjavanjem po logaritamski raspoređenim rasponima frekvencija, a S_\pm i (4.6–7) se zatim izračunaju kao njihove funkcije. Veza između linearnih (ko)spektara i S_\pm te parametara u (4.6–7) je dana u npr. Gonella (1972). Korisno svojstvo RSA jest da su svi parametri, osim α , neovisni o rotaciji koordinatnog sustava oko treće osi. Ovo nije prvi put da se RSA koristi u analizi bure, jer su Orlić i sur. (2005) prethodno primijenili RSA s ciljem ispitivanja turbulencije bure u vertikalnoj ravnini. Metoda je također korištena za analizu dnevne izmjene zmorca i kopnenjaka u regiji Kvarnera i Istre (Prtenjak i sur. 2008).



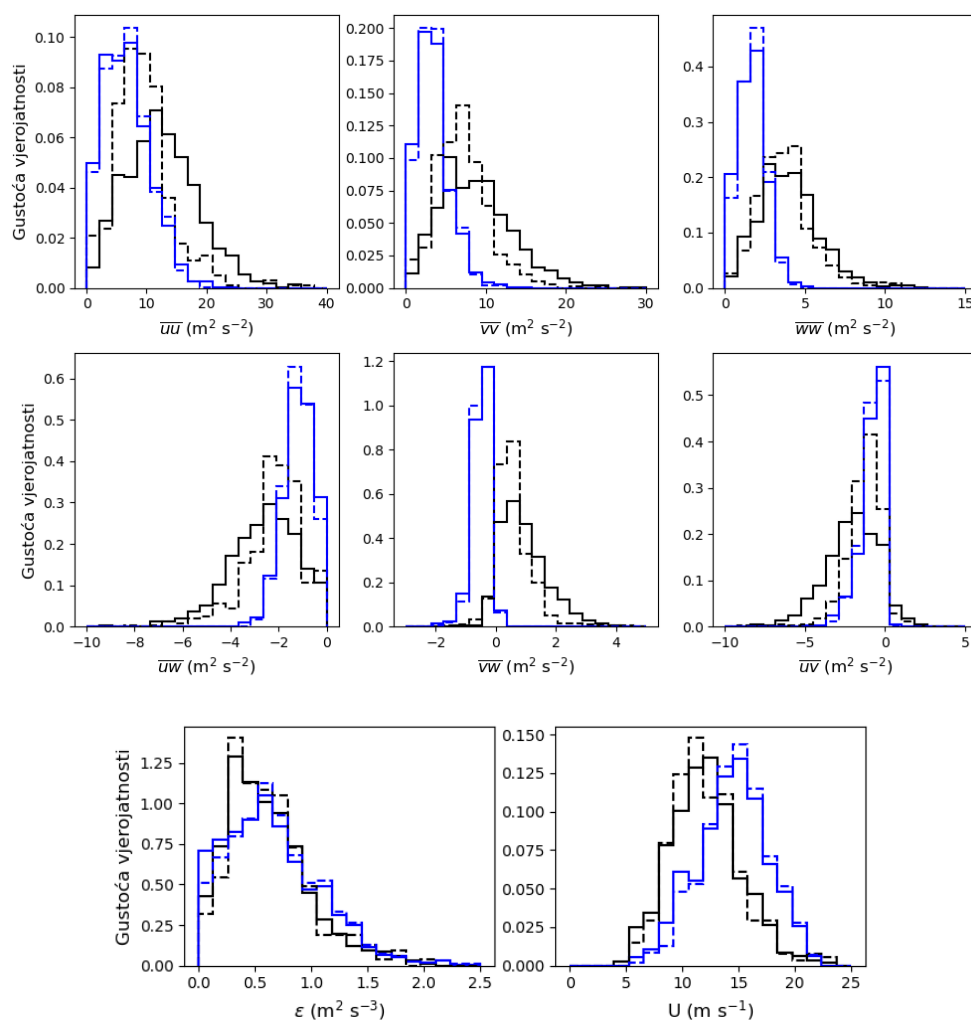
Slika 10: Prikaz putanje vektora brzine vjetra (na određenoj frekvenciji) u xy ravnini. **a)** predstavlja (pozitivno) kružno, **b)** eliptično, a **c)** pravocrtno gibanje. Za slučaj kružnog gibanja, os oscilacije (α) nema definiranu vrijednost.

5 REZULTATI

5.1 Značajke turbulencije u Senju i na Vratniku

5.1.1 Opće značajke

Rezultati u poglavljima 5.1.1–5.1.5 su zasnovani na Golem i sur. (2023). Komponente Reynoldsova smičnog tenzora R_{kl} (jednadžba 4.2), usrednjena vrijednost longitudinalne brzine vjetra (U) i viskozna disipacija TKE (ε) su izračunati metodama opisanim u Poglavljima 4.3.1 i 4.3.2 za sve 1-h periode i za obje mjerne postaje. Prikaz rezultata je dan u Tablici 3 i na Slici 11 pri čemu su samo periodi u kojima je zadovoljena Taylorova hipoteza (jednadžba 4.3) uzeti u obzir. Broj intervala koji ne zadovoljava (4.3) je malen. Tablica 3 prikazuje vrijednosti U i ε samo za konstantan τ jer obje veličine nisu osjetljive na odabir τ .



Slika 11: Raspodjele komponenti Reynoldsova smičnog tenzora, ε i U . Crnom (plavom) bojom su prikazane vrijednosti za Senj (Vratnik). Punom (isprekidanom) linijom su prikazane vrijednosti za konstantan (promjenjiv) τ .

Tablica 3: Medijani U , komponenti tenzora R_{kl} i ε . Crnom (crvenom) bojom su označene vrijednosti za konstantan (promjenjiv) τ .

| | U (m s ⁻¹) | \overline{uu} (m ² s ⁻²) | \overline{vv} (m ² s ⁻²) | \overline{ww} (m ² s ⁻²) | \overline{uw} (m ² s ⁻²) | \overline{vw} (m ² s ⁻²) | \overline{uv} (m ² s ⁻²) | ε (m ² s ⁻³) |
|---------|-----------------------------|--|--|--|--|--|--|--|
| Senj | 11,99 | 12,28/8,95 | 8,30/7,05 | 3,81/3,68 | -2,49/-2,10 | 0,79/0,50 | -1,96/-1,18 | 0,56 |
| Vratnik | 14,61 | 6,39/6,37 | 3,22/3,30 | 1,70/1,71 | -1,13/-1,14 | -0,44/-0,44 | -0,61/-0,63 | 0,61 |

U Senju vrijednosti TKE variraju od 5 do 25 m² s⁻² (konstantan τ), tj. od 5 do 20 m² s⁻² ako se izdvoje sub-mezoskalni doprinosi. Ovako visoke vrijednosti TKE su primijećene i u prijašnjim radovima (npr. Belušić i Klaić 2006). Na Vratniku je TKE 1,5 do 2 puta manji (medijan od 6 m² s⁻² nasuprot medijanu od 10–13 m² s⁻² u Senju, ovisno o tome da li je τ konstantan ili promjenjiv). Omjer \overline{vv} i \overline{uu} je jednak 0,7 u Senju te 0,5 na Vratniku, što znači da je smjer vjetera u Senju promjenjiviji (omjer je približno jednak bez obzira da li je τ konstantan ili promjenjiv). Razlika u TKE na dvjema postajama može imati dva uzroka. Prvi je veća aerodinamička duljina hrapavosti tla (z_0) u Senju. Medijan z_0 procijenjen prilagodbom jednadžbe (3.3) je 0,45 m u Senju i 0,03 m na Vratniku, što je blisko vrijednostima navedenim u literaturi (npr. S88). Drugi je izražena prisutnost pulsacija u Senju, zbog čega njihovo izdvajanje bitno smanjuje omjer TKE na dvjema postajama u korist Vratnika.

Vertikalni tok horizontalne količine gibanja ($-\overline{uw}$) je dvaput veći u Senju nego na Vratniku, što je i očekivano zbog većeg z_0 . Nadalje, znatne vrijednosti \overline{vw} i \overline{uv} na objema postajama ukazuju na prisutnost vertikalnog i horizontalnog smicanja vjetera, vjerojatno uzrokovanog heterogenostima lokalnog i uzvodnog reljefa (Babić i sur. 2016a). U Senju, pulsacije također znatno doprinose vrijednostima \overline{vw} i \overline{uv} , što se vidi u činjenici da izdvajanje pulsacija promjenjivim τ umanjuje \overline{uv} za 50% (Tablica 3). Naime, u koordinatnom sustavu orijentiranom u smjeru prizemnog vjetera, os oscilacije pulsacija se proteže uglavnom kroz 2. i 4. kvadrant (Poglavlje 5.3), pa one negativno doprinose \overline{uv} . Blizina elemenata hrapavosti (krovovi kuća, krošnje stabala itd.) također može utjecati na profile \overline{uw} , \overline{vw} i \overline{uv} (Poglavlje 3.1.2; R00; KF94).

Raspodjele ε su gotovo identične na objema postajama, što je na prvi pogled iznenađujuće jer je u suprotnosti sa zaključcima u Večenaj (2012) gdje je na temelju jednog događaja bure zaključeno da je $\varepsilon_{\text{Senj}} \approx 2\varepsilon_{\text{Vratnik}}$, slično omjeru TKE. Može se pokazati da je omjer $\varepsilon_{\text{Senj}}$ i

$\varepsilon_{\text{Vratnik}}$ različit u različitim događajima bure, što ističe potrebu korištenja većeg skupa događaja bure za postizanje pouzdanih zaključaka.

5.1.2 Međuovisnosti statističkih značajki turbulencije

Jedan od ciljeva ove cjeline je procijeniti koliko je ravnoteža TKE na dvjema postajama bliska ravnoteži NPS-a (Poglavlja 1.2 i 3.1). Računanje članova jednadžbe ravnoteže TKE zahtijeva podatke na nekoliko visina. Ti podaci u ovom slučaju nisu dostupni, pa se u svrhu približne procjene koriste odnosi TKE, ε i U . U NPS-u, gdje se ravnoteža TKE (jednadžba 3.1) temelji na ravnoteži člana smicanja (proizvodnje TKE) i viskozne disipacije TKE, vrijedi (jednadžba 3.5):

$$\varepsilon = \frac{u_*^3}{kz'}. \quad (5.1)$$

Koristeći proporcionalnost U i u_* u NPS-u (jednadžba 3.3) te izraze za bezdimenzijske standardne devijacije komponenti brzine vjetra (jednadžba 3.4), proporcionalnosti U , ε i TKE (od sada nadalje označene s e) su:

- $\varepsilon \propto U^3$,
- $e \propto U^2$,
- $\varepsilon \propto e^{3/2}$,

gdje je $e = (\sigma_u^2 + \sigma_v^2 + \sigma_w^2)/2$. Sve proporcionalnosti su oblika

$$y = ax^b, \quad (5.2)$$

gdje (x, y) označava parove varijabli (ε, U) , (e, U) i (ε, e) . Ako (5.1) vrijedi, onda se očekuje da prilagodba podataka krivulji oblika (5.2) daje vrijednosti koeficijenta b od, redom, 3, 2 i 1,5. Podaci se izrazu (5.2) mogu prilagoditi i na način da je samo koeficijent a promjenjiv, a $b = b_t$ je konstantan, tj. b_t je 3, 2, i 1,5. Ako ova dva pristupa daju slične vrijednosti koeficijenata a i b , a koji su također bliski teorijskim vrijednostima, onda se može reći da ravnoteža TKE na određenoj mjernoj postaji odgovara modelu u izrazu (5.1). Točnost prilagodbe se procjenjuje koeficijentom određenja (R^2 ; engl. *coefficient of determination*)

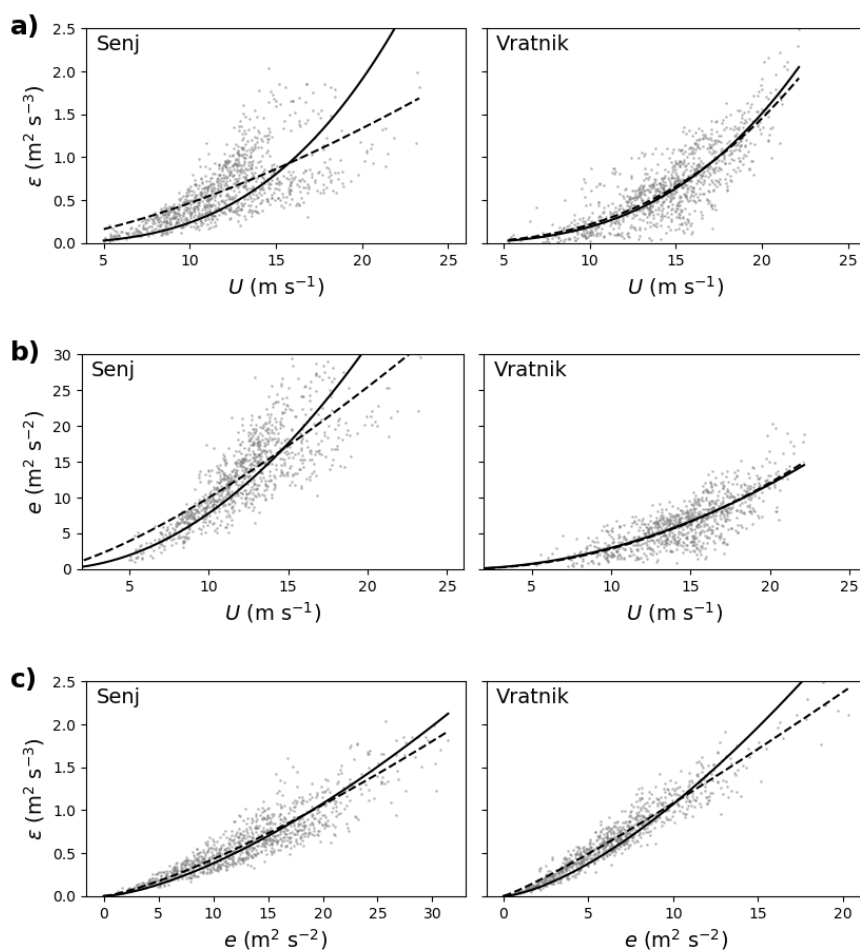
$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - f_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}, \quad (5.3)$$

gdje su y_i , \bar{y} i f_i , redom, promotrena vrijednost parametra, usrednjena vrijednost parametra i vrijednost parametra dobivena prilagodbom jednadžbe (5.2). Vrijednost bliska 1 ukazuje na dobru prilagodbu, a $R^2 = 0$ znači da prilagodba nije bolja od one koja uvijek predviđa usrednjenu vrijednost. Iz skupa podataka je izuzet period od 9. prosinca 2004. godine (08 UTC)

do 10. prosinca 2004. godine (20 UTC) zbog iznimno velikih vrijednosti ε ($2,5\text{--}4 \text{ m}^2 \text{ s}^{-3}$). Tumačenje ovako velikih vrijednosti ε je ostavljeno za budući rad.

Rezultati prilagodbe podataka jednadžbi (5.2) su prikazani na Slici 12. Na Vratniku su podaci grupirani oko jasno definiranih krivulja, koeficijent b približno je jednak teorijskoj vrijednosti, a koeficijenti a i a_t su približno jednaki. Jedan izuzetak je par (ε, e) gdje je $b \approx 1,1$, što je manje od teorijske vrijednosti. Slična vrijednost b (približno jednaka 1,3) je ostvarena i za Senj, iako s manjim R^2 . Približno jednaku vrijednost koeficijenta b u Senju su dobili i Večenaj i sur. (2012) za jedan izdvojen događaj bure. Za razliku od Vratnika, dijagrami raspršenja u Senju nisu dobro definirane krivulje, posebice za parove (ε, U) i (e, U) . Koeficijent b je manji od teorijske vrijednosti u oba slučaja. Raspršenje podataka nepovoljno utječe na točnost prilagodbe jer pomak malenog broja točaka (posebice točaka za koje je U velik) može uzrokovati značajnu promjenu koeficijenata prilagodbe. Sukladno tome, vrijednosti R^2 i koeficijenata prilagodbe za te parove nisu pouzdane. Ovakav oblik dijagrama raspršenja je vjerojatno uzrokovan anizotropijom površinskog pokrova uzvodno od tornja s mjernim uređajima, npr. Slika 13 prikazuje ovisnost dijagrama raspršenja (ε, U) o azimutu vjetra. To znači da z_0 ili z_d ovise o smjeru vjetra, pa sukladno i koeficijenti prilagodbe, iako koeficijent b ni za najsjeverniji azimut ne dostiže svoju teorijsku vrijednost. Ovo raslojavanje je prisutno i za par (e, U) , ali je bitno manje izraženo za par (ε, e) . Na Vratniku ovisnost podataka o azimutu vjetra nije izražena.

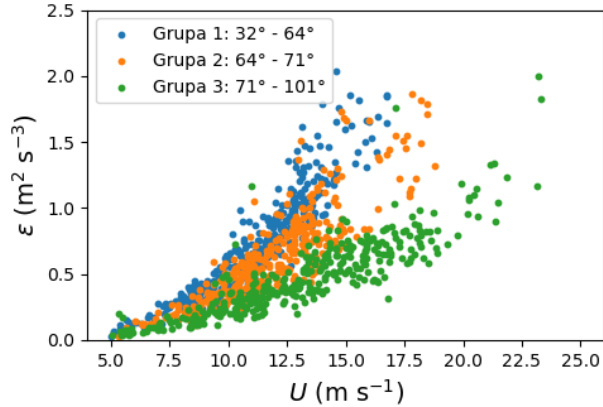
Slika 12 i Tablica 4 ukazuju, dakle, da je ravnoteža TKE na Vratniku bliža jednostavnoj ravnoteži NPS-a (opisanoj jednadžbom 5.1). U Senju, doprinos ostalih članova u jednadžbi (3.1) nije zanemariv. U sljedećem poglavlju biti će ispitana odstupanja od ravnoteže NPS-a uslijed utjecaja SH (Poglavlje 3.1.2) i nehomogenosti statističkih značajki turbulencije na dvjema postajama.



Slika 12: Dijagrami raspšenja za (a) ε i U , (b) e i U i (c) ε i e za Senj (lijevi stupac) i Vratnik (desni stupac). Puna linija predstavlja prilagodbu gdje su a i b slobodni parametri, a crtkana linija prilagodbu gdje je $b = b_t$ konstantan i jednak teorijskoj vrijednosti.

Tablica 4: Koeficijenti prilagodbe (jednadžba 5.2) za parove statističkih značajki. Prikazani su koeficijenti za promjenjiv τ ; rezultati su slični i za konstantan τ (nije prikazano).

| | (x,y) | a_t | b_t | R_t^2 | a | b | R^2 |
|----------------|------------------|----------------------|-------|---------|----------------------|------|-------|
| Senj | ε, U | $2,38 \cdot 10^{-4}$ | 3 | 0,11 | $1,41 \cdot 10^{-2}$ | 1,52 | 0,44 |
| | e, U | $7,82 \cdot 10^{-2}$ | 2 | 0,52 | $4,50 \cdot 10^{-2}$ | 1,35 | 0,66 |
| | ε, e | $1,21 \cdot 10^{-2}$ | 1,5 | 0,78 | $2,14 \cdot 10^{-2}$ | 1,30 | 0,80 |
| Vratnik | ε, U | $1,89 \cdot 10^{-4}$ | 3 | 0,69 | $3,90 \cdot 10^{-4}$ | 2,76 | 0,70 |
| | e, U | $2,97 \cdot 10^{-2}$ | 2 | 0,61 | $2,30 \cdot 10^{-2}$ | 2,09 | 0,62 |
| | ε, e | $3,40 \cdot 10^{-2}$ | 1,5 | 0,85 | $7,95 \cdot 10^{-2}$ | 1,13 | 0,92 |



Slika 13: Ovisnost dijagrama raspršenja $\varepsilon(U)$ o azimutu usrednjenog vjetra (Senj). Grupe 1, 2 i 3 predstavljaju podatke u 1-h periodima za koje je azimut vjetra između, redom, 32° i 64° , 64° i 71° te 71° i 101° . Ovisnost nagiba krivulje o azimutu vjetra ukazuje na anizotropiju površinskog pokrova (tj. z_0 i z_d) koja uvjetuje anizotropiju statističkih značajki turbulencije.

5.1.3 Nehomogenost i utjecaj sloja hrapavosti

Za ocjenu utjecaja SH koristim odabrane rezultate iz R00 i KF94 (Poglavlje 3.1.2). Za računanje bezdimenzijskih spektara brzine i bezdimenzijske disipacije (ϕ_ε) prvo se određuje visina istisnuća (z_d). S obzirom da mjerenja turbulentnog toka topline nisu dostupna, z_d se može približno procijeniti kao $z_d \approx z_H/2$ (npr. S88). U Senju z_d iznosi 5, a na Vratniku oko 2,5 m.

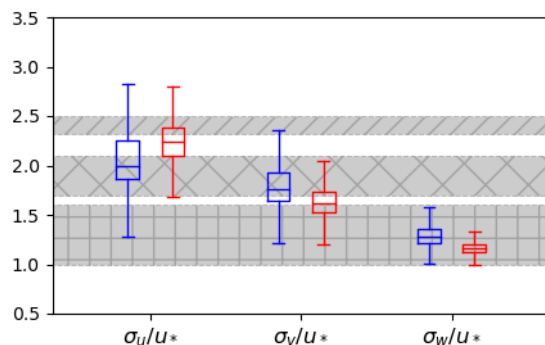
Prvo uspoređujem bezdimenzijske standardne devijacije komponenti brzine vjetra ($\phi_{u,v,w}$). U NPS-u (ko)varijance komponenti brzine vjetra su nepromijenjene s visinom, ali ovise o hrapavosti podloge posredstvom u_* . S88 i R00 navode sljedeće raspone vrijednosti:

$$\phi_u = \sigma_u/u_* \in (2,3; 2,5), \quad (5.4a)$$

$$\phi_v = \sigma_v/u_* \in (1,7; 2,4), \quad (5.4b)$$

$$\phi_w = \sigma_w/u_* \in (1,0; 1,6), \quad (5.4c)$$

dok KF94 navode $\phi_u = 2,5$ i $\phi_w = 1,25$. Ovi rasponi vrijednosti su na Slici 14 uspoređeni s $\phi_{u,v,w}$ na objema postajama. Može se primijetiti da su rezultati na dvjema postajama približno jednaki, pa se veća TKE u Senju može objasniti većom u_* koja je posljedica hrapavije podloge. Nadalje, ϕ_u i ϕ_v su ispod raspona vrijednosti za NPS, posebice za ϕ_u u Senju; prema R00 i KF94, ovo je očekivano odstupanje u SH. Vrijednosti $\phi_{u,v,w}$ imaju veći rasap u Senju, što je prema R00 uzrokovano anizotropijom površinskog pokrova karakterističnom za utjecaj SH.



Slika 14: Raspodjela $\phi_{u,v,w}$ za Senj (plava) i Vratnik (crvena boja). Korišteni su podaci s promjenjivim τ , ali su slični i za konstantan τ . Sjenčanje predstavlja očekivano područje vrijednosti za ϕ_u (kose crte), ϕ_v (rombovi) i ϕ_w (kvadrati) u NPS-u (jednadžbe 5.4a–c). Os ordinata je bezdimenzijska.

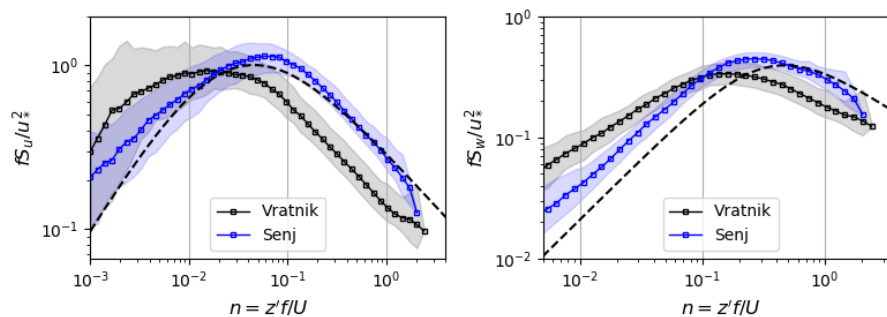
Drugi pokazatelj utjecaja SH su bezdimenzijski spektri snage komponenti brzine vjetra. U NPS-u, bezdimenzijski spektri ($fS_{u,v,w}/u_*^2$) su funkcije bezdimenzijske frekvencije $n = fz'/U$ (Kaimal i sur. 1972), a vrijednosti n na kojima postižu svoj maksimum, tj. vršna frekvencija, (n_{\max}) su poznate (Tablica 5). U SH postoji pomak vršne frekvencije prema nižim frekvencijama. S porastom z/z_H ovaj je pomak sve manji, pa n_{\max} konvergira prema vrijednostima u NPS-u. Visina z/z_H iznad koje se konvergencija očekuje je 1,5 za spektre horizontalne i 2,5 za spektar vertikalne brzine (Poglavlje 3.1.2).

Bezdimenzijski spektri snage longitudinalne i vertikalne komponente brzine vjetra su prikazani na Slici 15, a njihove vršne frekvencije su u Tablici 5 uspoređene s teorijskim vrijednostima u NPS-u. Pomak vršne frekvencije bezdimenzijskog spektra vertikalne komponente brzine je prisutan na obje postaje, ali samo u Senju postoji pomak i za spektar snage longitudinalne komponente brzine. Ovo ukazuje na utjecaj SH koji je u Senju jači nego na Vratniku, što je u skladu s bezdimenzijskom visinom postavljanja mjernog uređaja (z/z_H) koja u Senju iznosi $\sim 1,3$, a na Vratniku ~ 2 . Drugim riječima, utjecaj SH koji se očituje kao odstupanje bezdimenzijskih statističkih veličina od onih u NPS-u je na Vratniku manji zbog veće udaljenosti mjernog uređaja od okolnih elemenata hrapavosti (Poglavlje 3.1.2). Treba istaknuti da vršna frekvencija ovisi o procjeni z_d , pa bi se moglo zapitati jesu li opaženi pomaci u Senju posljedica krive procjene z_d . Zaključujem da nisu, jer čak i ako se koristi $z_d = 0$ (što bi krivulje na Slici 15 pomaklo udesno), vršne frekvencije su i dalje manje od vrijednosti u NPS-u.

Naposljetku, blag pad energije u spektru longitudinalne komponente brzine vjetra u Senju na frekvencijama nižim od n_{\max} je posljedica pulsacija i drugih submezoskalnih gibanja. Zbog njih je spektralni maksimum širi nego je uobičajeno, što su primijetili i Lepri i sur. (2017) u istraživanjima bure u zaleđu Splita. Ako se za računanje spektara odaberu samo 6-h periodi bez pulsacija, onda je oblik krivulje fS_u/u_*^2 sličan u Senju i na Vratniku, iako pomaknut prema nižim frekvencijama zbog utjecaja SH (nije prikazano).

Tablica 5: Usporedba vršnih frekvencija bezdimenzijskih spektara (n_{\max}) u Senju i na Vratniku s vrijednostima iz Kaimal i sur. (1972). Vršne frekvencije za konstantan i promjenjiv τ se bitno ne razlikuju.

| | Kaimal i sur. (1972) | Senj | Vratnik |
|--------------|----------------------|------|---------|
| $n_{u,\max}$ | 0,03–0,08 | 0,02 | 0,06 |
| $n_{w,\max}$ | 0,5–0,6 | 0,16 | 0,27 |



Slika 15: Bezdimenzijski spektri longitudinalne (lijevo) i vertikalne (desno) komponente brzine. Kvadratići predstavljaju medijan, a osjenčano područje raspon između 10 i 90%-tnog kvantila svih spektara. Crtkane krivulje su spektri iz Kaimal i sur. (1972). Prikazani su spektri za konstantan τ ; korištenje promjenjivog τ uzrokuje vertikalni pomak krivulja bez promjene vršnih frekvencija.

Utjecaj SH je prisutan i kod bezdimenzijske viskozne disipacije TKE (jednadžba 3.5 u Poglavlju 3.1.1). Navedeni izraz je posljedica lokalne ravnoteže ε i smične proizvodnje TKE, pa odstupanja od jednadžbe (3.5) ukazuju na doprinose ostalih članova jednadžbe ravnoteže TKE (3.1). U gornjem dijelu SH turbulentni transport (TT, član IV) je ponor TKE (KF94), pa ako su utjecaji SH znatni, očekuje se $\phi_\varepsilon < 1$. Naime, u NPS-u je ε jedini član koji u jednadžbi (3.1) uravnotežuje član smične proizvodnje (II). Ako je TT ponor TKE, što vrijedi u gornjem dijelu SH, onda da bi jednadžba (3.1) bila uravnotežena (pretpostavljajući statističku

stacionarnost i zanemarivanje ostalih članova jednadžbe) ε se treba smanjiti. Za računanje ϕ_ε sam odabrao vrijednosti u_* za promjenjiv τ . Na Vratniku z_d iznosi 2,5 m, pa medijan ϕ_ε iznosi 1,16. Uzimajući u obzir poteškoće pri određivanju z_d , ova vrijednost je približno jednaka teorijskoj. Za Senj, odabir $z_d = 5$ m daje $\phi_\varepsilon = 0,59$, značajno manje od 1. Za slučaj konstantnog τ , ϕ_ε postaje još i manji zbog veće vrijednosti u_* .

Analiza odabranih bezdimenzijskih statističkih značajki je pomogla protumačiti razlike u TKE i ε na dvjema postajama. Funkcije $\phi_{u,v,w}$ približno su jednake, što znači da se razlika u TKE na dvjema postajama može (izuzev submezoskalnih doprinosa u Senju) objasniti razlikom u lokalnoj z_0 koja proizvodi veće površinske tokove količine gibanja (u_* ; jednadžba 3.3). Činjenica da je na Vratniku $\phi_\varepsilon \sim 1$, a u Senju značajno manje od 1 pomaže protumačiti rezultat $\varepsilon_{\text{Senj}} \approx \varepsilon_{\text{Vratnik}}$ iz Poglavlja 5.1.1, zato što $\phi_\varepsilon < 1$ ukazuje na značajne doprinose ostalih članova jednadžbe ravnoteže TKE koji djeluju kao ponor TKE. Da to nije slučaj, tj. da je ε jedini ponor TKE na objema postajama, puno veći u_* u Senju i približno jednaka vrijednost z' ($z' \approx 8$ m u Senju i $z' \approx 7$ m na Vratniku) uzrokovali bi veće vrijednosti ε (jednadžba 3.5). Jedan od razloga ove razlike u ravnoteži TKE među dvjema postajama je da obje postaje pokazuju utjecaje SH, ali su na Vratniku oni manje izraženi zato što se mjerni uređaj na Vratniku nalazi bliže gornjem rubu SH. Ovo je najbolje prikazano bezdimenzijskim spektrima snage koji u Senju pokazuju pomake vršnih frekvencija za longitudinalnu i vertikalnu, a na Vratniku samo za vertikalnu komponentu brzine vjetra.

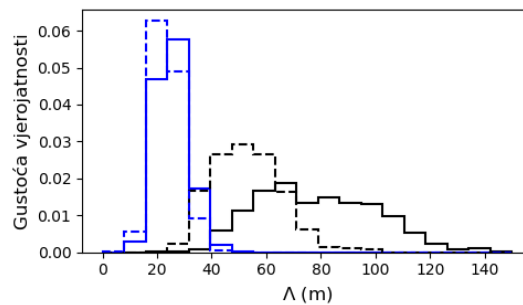
Na razlike među statističkim značajkama turbulencije može utjecati i lokalni reljef koji može uzrokovati odstupanja u ravnoteži TKE slična utjecaju SH (npr. povećana važnost člana TT; Večenaj i sur. 2021). Jedina razlika koja se sa sigurnošću može pripisati relativnim pozicijama tornjeva prisutnost je pulsacija koje su česte Senju, a vrlo rijetke na Vratniku. Pulsacije nastaju iznad zavjetrinskih obronaka, što je u pravilu nizvodno od Vratnika (Belušić i sur. 2007; Poglavlje 5.3.6).

5.1.4 Duljinska skala i intenzitet turbulencije

Parametri bitni za numeričko modeliranje AGS-a i primjene u području aerodinamike okoliša i konstrukcija su integralna duljinska skala turbulencije (Λ) i intenzitet turbulencije ($I_{u,v,w}$). Λ je empirijska mjera često korištena u parametrizacijama AGS-a (npr. Mellor i Yamada 1974):

$$\Lambda = \frac{e^{3/2}}{\varepsilon}. \quad (5.5)$$

Λ se može smatrati dimenzijom najintenzivnijih turbulentnih vrtloga, a ovisi o visini iznad tla, statičkoj stabilnosti atmosfere te, ako je z/z_H dovoljno malen, strujanju zraka oko elemenata hrapavosti. Slika 16 prikazuje histograme Λ u Senju i na Vratniku. Razlog većoj vrijednosti Λ u Senju je veća hrapavost tla, kao i prisutnost pulsacija (oba uzrokuju povećanje e), što je očito iz raspodjela Λ za konstantan i promjenjiv τ . Ovo treba imati na umu pri usporedbi Λ iz numeričkih modela i mjerenja, jer većina meteoroloških parametrizacija AGS-a ne uzima u obzir nelokalne, niskofrekventne doprinose TKE. Na veću širinu raspodjele Λ u Senju utjecaj ima i anizotropnost površinskog pokrova (nije prikazano).



Slika 16: Raspodjele duljinskih skala turbulencije na dvjema postajama. Crnom (plavom) bojom prikazane su raspodjele za Senj (Vratnik); punom (isprekidanom) linijom prikazane su vrijednosti za konstantan (varijabilan) τ .

Intenziteti turbulencije $I_{u,v,w}$ su definirani kao omjer standardne devijacije komponenti brzine vjetra i U (npr. Holmes 2015):

$$I_{u,v,w} = \frac{\sigma_{u,v,w}}{U}. \quad (5.6)$$

Koriste se kao mjera snage turbulencije, npr. pri izgradnji vjetroelektrana, gdje je poželjan nizak intenzitet turbulencije. Primijetimo da je (5.6) kvalitativno slična izrazu za procjenu valjanosti Taylorove hipoteze o „zamrznutoj turbulenciji“ (npr. S88; jednačba 4.3). Vrijednosti $I_{u,v,w}$ u Senju i na Vratniku su prikazane na Slici 17 i u Tablici 6. Kao i s drugim parametrima, $I_{u,v,w}$ u Senju ovisi o odabiru τ . Bez izdvajanja submezoskalskih gibanja, intenzitet turbulencije u Senju je precijenjen. Medijani I_u su u rasponu očekivanih vrijednosti za ruralne (0,1–0,2) i urbane (0,2–0,35) sredine (Counihan 1975). Razlike između ruralnih i urbanih sredina su uzrokovane razlikom u z_0 ; ovo je očekivano jer se može pokazati da je u NPS-u $I_{u,v,w}$ proporcionalan s $(\ln(z'/z_0))^{-1}$. Kako je z' na objema postajama približno

jednak, razlika u $I_{u,v,w}$ se može pripisati razlici u z_0 . Tablica 6 pokazuje omjere komponenti intenziteta turbulencije. Counihan (1975) i Holmes (2015) navode sljedeće omjere, redom:

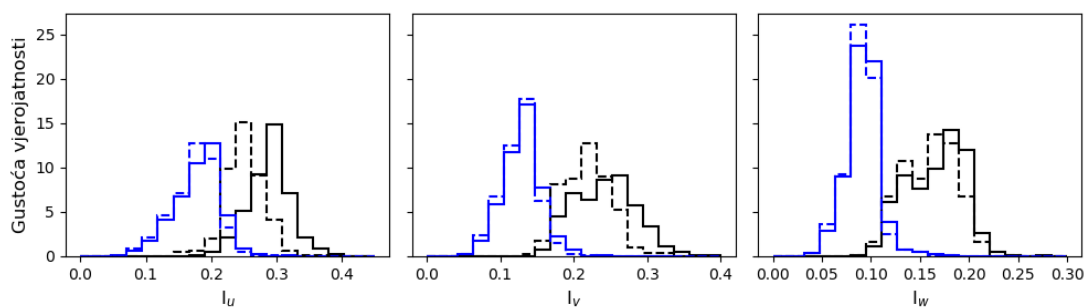
$$I_u : I_v : I_w = 1 : 0,75 : 0,5, \quad (5.7a)$$

$$I_u : I_v : I_w = 1 : 0,88 : 0,55. \quad (5.7b)$$

Omjeri na Vratniku odgovaraju omjerima u Counihan (1975), dok su rezultati u Senju između raspona danih u Counihan (1975) i Holmes (2015). Lepri i sur. (2015) su za ljetni događaj bure u blizini Splita pronašli $I_v/I_u \approx 1$. Ovo je u suprotnosti s rezultatima ovog rada, posebice na Vratniku, te naglašava utjecaj reljefa na značajke turbulencije bure.

Tablica 6: Medijani komponenti intenziteta turbulencije i omjera komponenti intenziteta turbulencije. Crnom (crvenom) bojom su prikazane vrijednosti s konstantnim (promjenjivim) τ .

| | I_u | I_v | I_w | I_v/I_u | I_w/I_u |
|----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Senj | 0,29/0,25 | 0,24/0,22 | 0,17/0,16 | 0,83/0,88 | 0,59/0,64 |
| Vratnik | 0,19/0,18 | 0,13/0,13 | 0,09/0,09 | 0,68/0,72 | 0,47/0,50 |



Slika 17: Raspodjela $I_{u,v,w}$. Crna (plava) boja predstavlja vrijednosti u Senju (na Vratniku), a puna (isprekidana) linija predstavlja raspodjelu za konstantan (promjenjiv) τ .

5.1.5 Diskusija i osvrt

U ovoj cjelini sam proučio razlike u statističkim značajkama turbulencije bure na dvjema postajama za opsežan skup podataka (ukupno oko 6 mjeseci). Odabrane su dvije karakteristične lokacije, jedna na zavjetrinskoj strani planinskih vrhova (na obali, u gradu Senju) i druga na planinskom grebenu, uzvodno od obale (Vratnik). Naglasak je na događajima u kojima je bura puhala istovremeno na obje postaje. Frekvencija uzorkovanja (f_s) soničnih anemometara je 4 Hz. Kako bih proučio utjecaj uvrštavanja submezoskalnih gibanja (tj. pulsacija) u definiciju turbulencije, koristio sam konstantnu (15 min) i promjenjivu vremensku skalu τ . U oba slučaja

je za određivanje τ korištena metoda spektralnog procjepa (Metzger i Holmes 2008). Za izračun viskozne disipacije TKE (ε) sam koristio inercijsko-disipacijsku metodu. Njena primjena je opravdana zbog prisustva spektralnog nagiba $-5/3$ u inercijskom dijelu spektra.

TKE u Senju je 1,5–2 puta veća nego na Vratniku. Na obje postaje je većina TKE sadržana u longitudinalnoj komponenti (oko 50%), ali Senj ima proporcionalno više energije u lateralnom smjeru. Iznosi TKE su slični vrijednostima danim u prethodnim radovima (Belušić i Klaić 2006; Belušić i sur. 2006; Večenaj 2012; Večenaj i sur. 2012). Viskozna disipacija TKE je sličnih iznosa na objema postajama, u suprotnosti s prijašnjim radovima koji su promatrali samo jedan događaj bure (Večenaj 2012). Jedan od razloga je značajna vremenska promjenjivost omjera $\varepsilon_{\text{Senj}}$ i $\varepsilon_{\text{Vratnik}}$ (tj. omjer nije konstantan u svim događajima bure), što naglašava potrebu istraživanja na većim skupovima podataka.

Kako statističke značajke turbulencije ovise o relativnim veličinama procesa koji u AGS-u proizvode ili prigušuju TKE, procijenio sam odstupanje ravnoteže TKE na dvjema postajama od smično-disipacijske ravnoteže statički neutralnog prizemnog sloja (NPS). Dijagrami raspršenja U , ε i TKE su pokazali da na Vratniku približno vrijedi $\varepsilon \propto U^3$ i $\text{TKE} \propto U^2$, što se slaže s navedenim pojednostavljenim modelom. U Senju je rasap podataka veći i nepravilniji, uvelike uzrokovano anizotropijom z_0 , tj. ovisnošću hrapavosti površine o azimutu prizemnog vjetra. Nijedna od postaja ne pokazuje teorijsku ovisnost $\varepsilon \propto \text{TKE}^{1.5}$; umjesto toga je eksponent jednak 1,3 za Senj i 1,1 za Vratnik. Ove vrijednosti su u skladu s prethodnim istraživanjima (Večenaj 2012; Večenaj i sur. 2012). Odstupanja od ravnoteže TKE karakteristične za NPS su veća u Senju nego na Vratniku. Ova odstupanja se djelomično mogu objasniti usporedbom bezdimenzijske disipacije, spektara snage i momenata komponenti brzine vjetra, a koja ukazuje na odstupanja karakteristična za mjerenja u SH. Odstupanja su izraženija u Senju zbog niže visine postavljanja instrumenta u odnosu na visinu elemenata hrapavosti. Ovo se najbolje vidi u bezdimenzijskim spektrima koji u Senju pokazuju pomake vršnih frekvencija za sve komponente brzine (nasuprot Vratniku gdje je pomak primijećen samo u spektru vertikalne brzine). Utjecaj SH također pomaže protumačiti približno jednake iznose ε na dvjema postajama; povećana važnost člana turbulentnog transporta kao ponora TKE smanjuje ε potrebnu za uravnoteživanje smične proizvodnje TKE. Kako je utjecaj SH u Senju veći, ε je manji no što se očekuje uzevši u obzir veću brzinu trenja i podjednaku efektivnu visinu mjernog uređaja iznad tla. Razlike u vrijednostima TKE objašnjene su

istovremenim djelovanjem submezoskalnih doprinosa (pulsacija) i veće aerodinamičke duljine hrapavosti u Senju (Golem i sur. 2023).

Utjecaj reljefa na razlike u statističkim značajkama turbulencije na dvjema postajama nije moguće u potpunosti odvojiti od utjecaja lokalnog površinskog pokrova (tj. utjecaja SH). Samo je česta pojava pulsacija u Senju, za razliku od Vratnika, nedvosmislena posljedica različitih položaja tornjeva. Za dodatno pojašnjenje ovih fizikalnih pojava su nužna mjerenja iznad SH (10–30 m iznad tla na Vratniku i 20–60 m iznad tla u Senju), poželjno na nekoliko visina i za više parova tornjeva.

Integralna duljinska skala turbulencije je 2–3 puta veća u Senju nego na Vratniku, iako ovisi o tome da li se koristi konstantan ili promjenjiv τ . Intenzitet turbulencije je u rasponu vrijednosti danih u međunarodnim standardima, ali odstupa od vrijednosti prethodno izmjerenih na srednjem Jadranu.

5.2 Izračun TKE numeričkim modelom

5.2.1 Postavke numeričkog modela

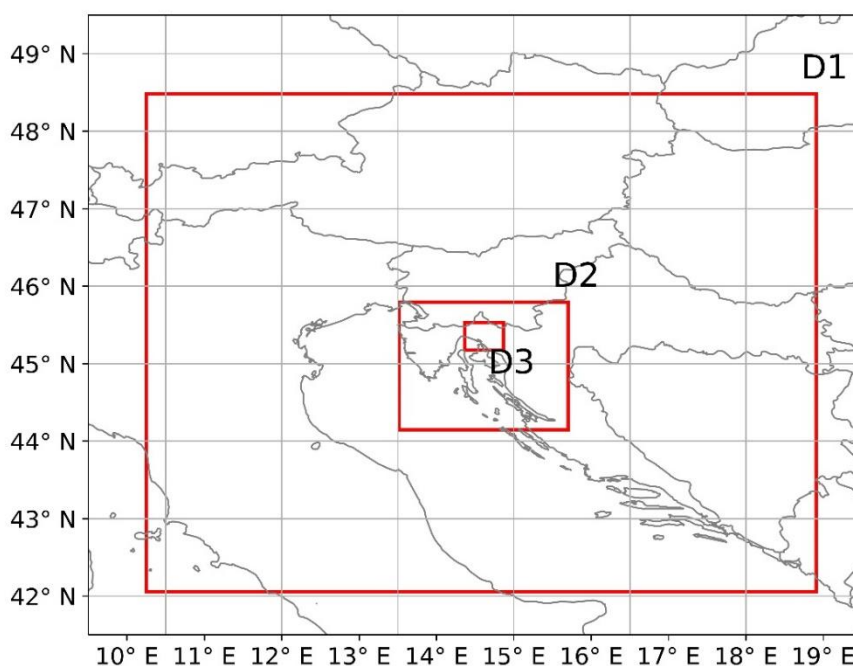
Za simulaciju bure je odabran WRF-ARW model, verzija 4.2 (Skamarock i sur. 2021). Korištene su tri jednosmjerno ugniježdene mreže horizontalnih koraka 4,5 km, 900 m i 300 m (Slika 18). Dvosmjerna komunikacija isključena je zbog numeričkih grešaka pri omjerima koraka mreže većih od 1:3 (npr. <https://github.com/wrf-model/WRF/issues/1539>; zadnji pristup 19. rujna 2021). Za vertikalnu koordinatu je korištena hibridna sigma-tlak mreža s 90 razina (Klemp 2011). U brdovitom terenu je gustoća vertikalne mreže bitna za određivanje dinamike strujanja zraka u nižim slojevima atmosfere, posebice u AGS-u, što je postignuto korištenjem osam vertikalnih razina u području do 200 m iznad tla. Najniža razina je smještena na visini od 20 m. Korišteni su *Climate Forecast System v2* (Saha i sur. 2011; rezolucija 0,5°) rubni uvjeti. Vertikalni turbulentni transporti u AGS-u su parametrizirani Mellor-Yamada-Nakanishi-Niino (MYNN; Nakanishi i Niino 2006) shemom reda zatvaranja „2,5“. Ova shema računa TKE koristeći pojednostavljenu verziju jednadžbe ravnoteže TKE (jednadžba 3.1). Ostale parametrizacije su navedene u Tablici 7.

Za simulacije u brdovitom terenu je važan točan prikaz reljefa (npr. Liu i sur. 2020), što zahtijeva relativno kratak korak mreže i detaljan digitalni model Zemljine površine. Navedeni

parametri utječu na prizemnu brzinu i smjer vjetra, mjesto odvajanja zavjetrinskog vala od podloge te vrijednosti TKE (npr. Ágústsson i Ólafsson 2014). Na primjer, Belušić i Klaić (2006) i Simić (2019) koristili su numeričke modele koraka mreže od, redom, 3 i 4 km za simulaciju priobalne bure; u oba slučaja vrijednosti TKE su znatno potcijenjene. Sukladno se u ovom radu koristi korak mreže od 0,3 km uz ASTER model reljefa (NASA 2019) prostorne rezolucije 1 lučne sekunde (oko 20 m u umjerenim geografskim širinama).

Tablica 7: Parametrizacije WRF modela korištene u simulaciji

| Fizikalni proces | Parametrizacija |
|--------------------------|--|
| Mikrofizika | <i>Single-moment 6-class</i> shema (Hong i Lim 2006b) |
| Kratkovalno zračenje | Dudhia kratkovalna shema (Dudhia 1989) |
| Dugovalno zračenje | <i>Rapid Radiative Transfer Model</i> (RRTM; Mlawer i sur. 1997) |
| Površinski procesi | Noah-MP (<i>multiparametrization</i>) shema (Niu i sur. 2011) |
| Konvekcija (9 km domena) | Kain-Fritsch shema (Zheng i sur. 2016) |



Slika 18: Domene numeričkog modela. Broj točaka mreže u pojedinim domenama je 160×160 (D1), 195×205 (D2) i 132×132 (D3). Toranj s mjernim uređajima je postavljen u domeni D3.

5.2.2 Usrednjena vrijednost brzine i smjera vjetra

Rezultati u poglavljima 5.2.1–5.2.4 se temelje na Golem i sur. (2022). Za validaciju simulacije je odabrana točka numeričke mreže najbliža poziciji tornja te su iz nje izdvojeni vremenski nizovi brzine i smjera vjetra te TKE. Sinoptičko stanje povezano s nizom događaja bure je opisano u Poglavlju 4.1.2. Simulacija je provedena za period od 23. siječnja do 16. veljače 2012. godine.

Slika 19a,b prikazuje simuliranu i izmjerenu brzinu i smjer vjetra na svim visinama. Bura (definirana kao vjetar azimuta od 0° do 90°) počinje 24. siječnja, a završava u kasnim popodnevnim satima 14. veljače 2012. godine. Postojanog je i vertikalno homogenog smjera ($\sim 60^\circ$ na svim visinama). Podudaranje smjera vjetra izvrsno je kroz čitav vremenski period, izuzev početka i kraja događaja te nakon 7. veljače na 50 m iznad tla (vjerojatno zbog kvara na vjetrulji; Poglavlje 4.2.1). Usrednjena vrijednost brzine vjetra (Slika 19b i Tablica 8) u pravilu je vrlo dobro modelirana, ali postoje periodi s odstupanjima. Prema razini odstupanja, niz se može podijeliti na nekoliko cjelina:

- početak i kraj događaja (24. do 29. siječnja i od 14. do 16. veljače),
- plitka bura (PB; od 29. siječnja do 6. veljače i od 10. do 14. veljače) i
- duboka bura (DB; od 6. do 10. veljače).

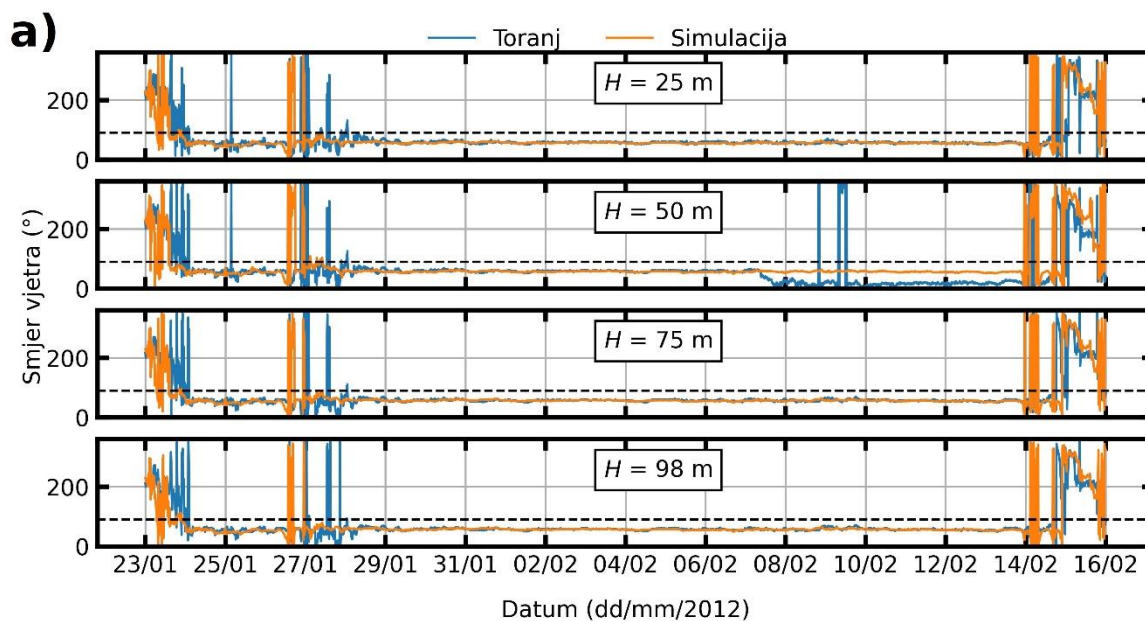
Slika 20 prikazuje usrednjene vrijednosti simulirane i izmjerene brzine vjetra, kao i pristranost (engl. *bias*) i RMSE simulacije u navedenim periodima. Tijekom PB je podudaranje izvrsno, s pristranošću koja gotovo iščezava te RMSE od približno 10–15%. Iznimku predstavlja precijenjena brzina vjetra na najnižoj visini iznad tla. Profili simulirane brzine vjetra ukazuju na prisutnost niske mlazne struje koja u mjerenjima nije opažena. Umjesto toga, profil izmjerene brzine vjetra je u skladu s logaritamskim zakonom. Podudaranje je također lošije na početku i kraju događaja (kad je brzina vjetra manja od oko 20 m s^{-1}) te tijekom DB. U ovim periodima je brzina vjetra precijenjena, a RMSE iznosi i do 60% (početak događaja) te 20–25% (DB) usrednjene vrijednosti brzine vjetra. Smanjenje točnosti simulacije tijekom DB je prethodno zapaženo i na južnoj obali Jadrana (Keresturi 2014).

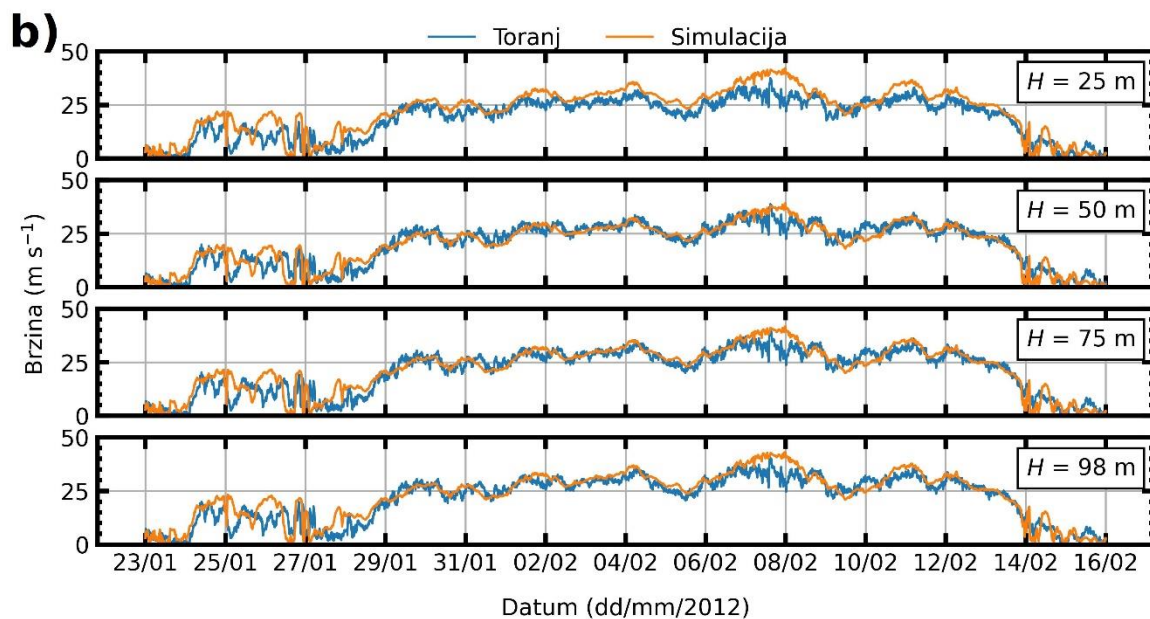
Općenito je podudaranje simulirane i izmjerene horizontalne brzine vjetra izvrsno za brzine veće od $\sim 20 \text{ m s}^{-1}$, osim kada je bura duboka. Za brzine manje od 20 m s^{-1} je podudaranje lošije, ali još uvijek prihvatljivo. Nije poznato koji je razlog razlici u podudaranju iznad i ispod $\sim 20 \text{ m s}^{-1}$. Moguće je da pri većim brzinama vjetra parametrizacije turbulentnih tokova topline,

količine gibanja itd., a za koje su zadužene sheme koje u brdovitom terenu često nisu primjerene (Serafin i sur. 2018; Kozmar i Grisogono 2021), nisu toliko važne kao snažan mezoskalni gradijent tlaka.

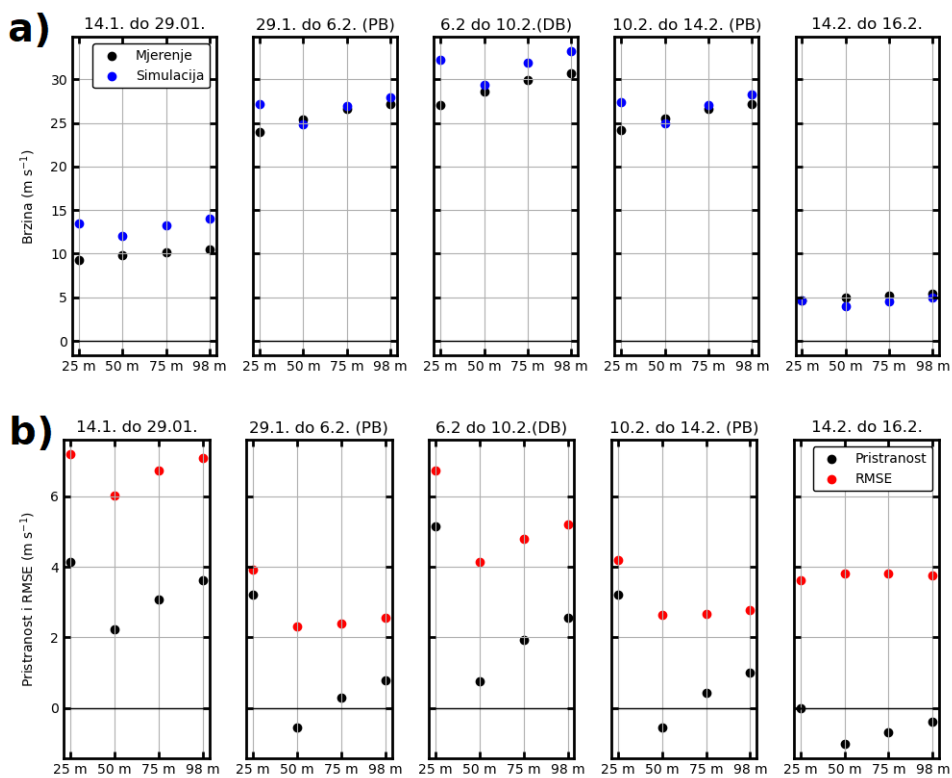
Tablica 8: RMSE, pristranost i koeficijent korelacije između simuliranog i izmjerene brzine vjetra.

| | RMSE (m s^{-1}) | Pristranost (m s^{-1}) | Koef. korelacije |
|------|----------------------------|-----------------------------------|------------------|
| 25 m | 4,05 | 3,38 | 0,92 |
| 50 m | 3,84 | 0,26 | 0,92 |
| 75 m | 4,09 | 1,10 | 0,92 |
| 98 m | 4,17 | 1,60 | 0,92 |

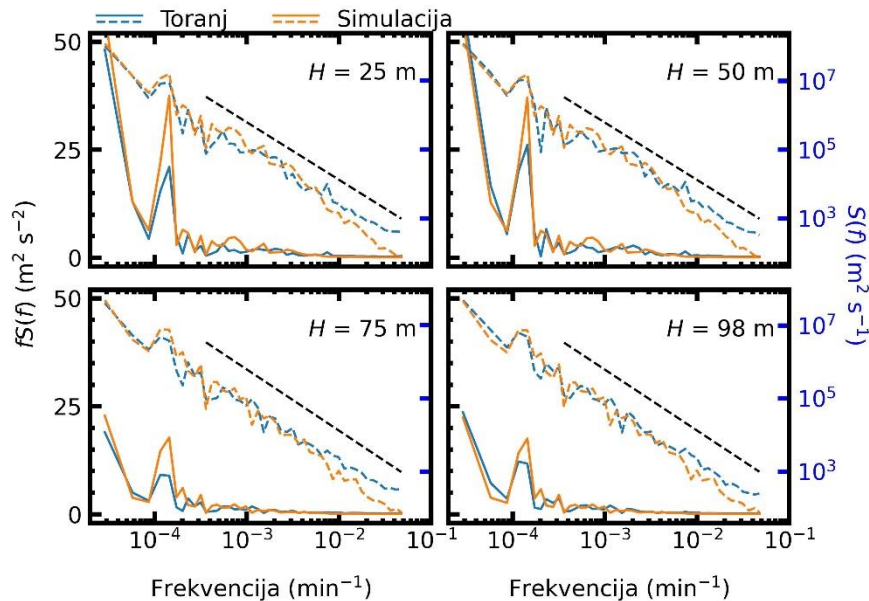




Slika 19: 10-minutne usrednjene vrijednosti (a) smjera i (b) brzine vjetra na svim visinama.



Slika 20: (a) Usrednjene vrijednosti izmjerene i simulirane brzine vjetra te (b) prisanost i RMSE brzine vjetra u različitim periodima. Prikazani su isti podaci kao na Slici 18.



Slika 21: Usporedba spektara zonalne komponente brzine vjetra za sve visine iznad tla. Punom linijom su prikazani frekvencijom otežani spektri u logaritamsko-linearnom, a isprekidanom u logaritamskom prikazu. Isprekidana crna linija označava nagib od $-5/3$.

Spektri zonalne komponente brzine također su dobro simulirani (Slika 21), osim na najvišim frekvencijama i na frekvencijama od približno 10^{-4} min^{-1} (period 2–4 dana), gdje simulacija precjenjuje energiju gibanja. Opadanje spektralne amplitude simulirane brzine vjetra na visokofrekventnom rubu je vjerojatno rezultat numeričkih filtera koji prigušuju kratkovalne poremećaje (u WRF-u su to valne duljine manje od $6-7 \Delta x$). Spektri se protežu od sinoptičke skale do visokofrekventnog (desnog) ruba mezoskale, pri čemu s Nyquistovom frekvencijom od $1/20 \text{ min}^{-1}$ nije moguće razlučiti mikroskalu. Spektralni nagib $-5/3$ se proteže duboko u mezoskalni dio spektra, u suglasju s rezultatima avionskih mjerenja 1980.-ih godina (Nastrom i Gage 1985) koji su pokazali nagib od $-5/3$ na valnim duljinama od 3 km do 400 km (jednako periodima od nekoliko minuta do 12 h). Gage (1979) navodi inverznu energetsku kaskadu kao mogući uzrok ovog spektralnog nagiba. U slučaju spektara na Slici 20 se nagib od $-5/3$ proteže i prema periodima duljim od 12 h.

5.2.3 Usporedba vrijednosti TKE

Važan cilj rada je ispitivanje točnosti numeričkog modela s obzirom na izmjerene vrijednosti i profile TKE. Simulirana vrijednost TKE je izdvojena iz točke numeričke mreže najbliže tornju.

Vrijednost horizontalne komponente TKE na tornju je procijenjena pomoću 10-min usrednjene vrijednosti i standardne devijacije brzine i smjera vjetra (Dodatak A1). Ako su e_H i \hat{e}_H , redom, stvarna i procijenjena vrijednost horizontalne TKE, onda vrijedi:

$$2e_H \approx \sigma_U^2 + \mu_U^2 \sigma_\theta^2 \equiv 2\hat{e}_H, \quad (5.8)$$

gdje su μ_U i σ_U , redom, usrednjena vrijednost i standardna devijacija horizontalne brzine vjetra, a σ_θ je standardna devijacija smjera horizontalne brzine vjetra. Izraz (5.8) je točna procjena e_H za relativno mali σ_θ . Dodatak A1 sadrži detaljniju diskusiju o točnosti izraza i postupku ispravka za veće vrijednosti σ_θ . Treba napomenuti da \hat{e}_H potcjenjuje stvarnu vrijednost TKE s obzirom da vertikalna komponenta brzine vjetra na tornju nije mjerena. Ovo treba uzeti u obzir pri usporedbi sa simuliranom vrijednosti TKE (e_s od sada nadalje) jer e_s sadrži doprinose svih triju komponenti brzine vjetra. To znači da se e_s treba usporediti s \hat{e}_H povećanim za faktor ispravka. Panofsky i Dutton (1984) navode da u neutralno stratificiranom strujanju u blizini tla vertikalna komponenta sadrži ~16% ukupne vrijednosti TKE. Ovaj faktor ispravka treba uzeti u obzir u usporedbama e_s i \hat{e}_H .

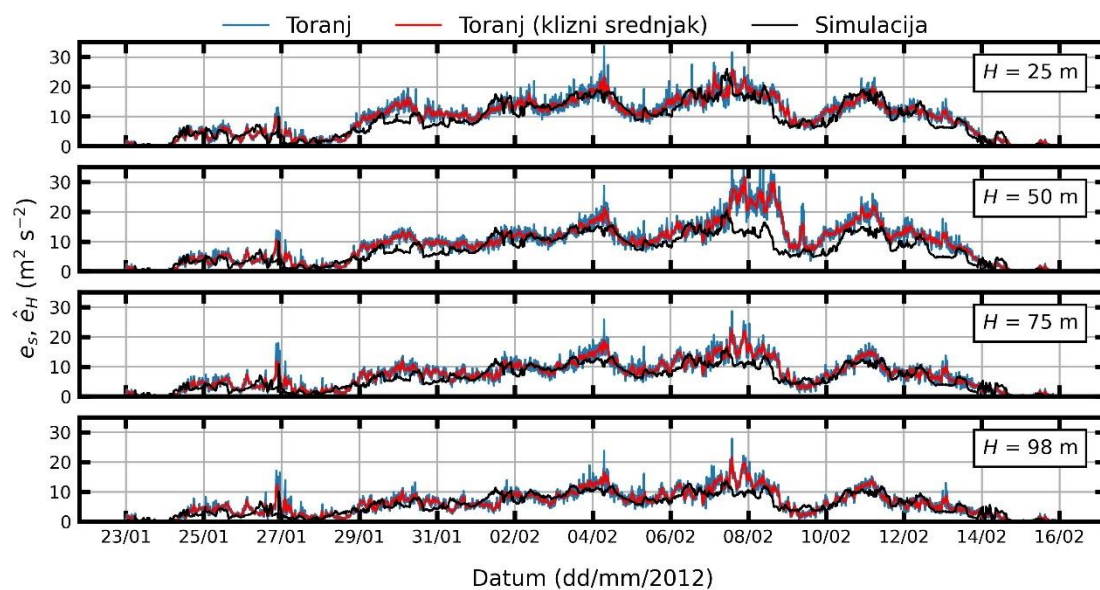
S obzirom na vremenske skale (τ) koje odvajaju turbulentna i (sub)mezoskalna gibanja (Poglavlje 4.3.1), potrebno je ispitati prikladnost 10-min perioda u kojem se računaju usrednjene vrijednosti i standardne devijacije brzine i smjera vjetra. 10-min period je uobičajeni period usrednjavanja u području aerodinamike okoliša i konstrukcija (npr. Eurocode standard; HRN EN 1991) i sličan je vrijednostima u npr. Večenaj (2012) (10 min) te malo manji od Lepri i sur. (2017) (17 min). Stiperski i sur. (2019) su utvrdili da je u uvjetima neutralnog do slabo stabilnog/nestabilnog prizemnog sloja primjerena vrijednost τ od 1 do 30 min. Sukladno je 10-min period usrednjavanja prihvaćen za procjenu horizontalne TKE.

Usporedba e_s i \hat{e}_H je prikazana na Slici 22 i u Tablici 9. Rezultati numeričke simulacije TKE su zadovoljavajući, osim na visini od 50 m nakon 7. veljače 2012. godine. Razlog je kvar na vjetrulji (Poglavlje 4.2.1), pa je stoga \hat{e}_H na toj visini nakon 7. veljače manje pouzdan. U prosjeku, pristranost i RMSE iznose približno, redom, 10% i 20%, iako su vrijednosti oba parametra nešto veće jer \hat{e}_H ne sadrži varijancu vertikalne komponente brzine. TKE pokazuje sličnu ovisnost o periodu puhanja bure kao usrednjena vrijednost brzine (Slika 23). Podudaranje je najbolje tijekom PB (RMSE ~20%) te ponešto lošije tijekom DB (RMSE ~25–30%). Najveća odstupanja (RMSE i do 100% vrijednosti TKE) su prisutna pri početku i kraju događaja. Može se pokazati da je za periode s lošijim podudaranjem (početak i kraj događaja)

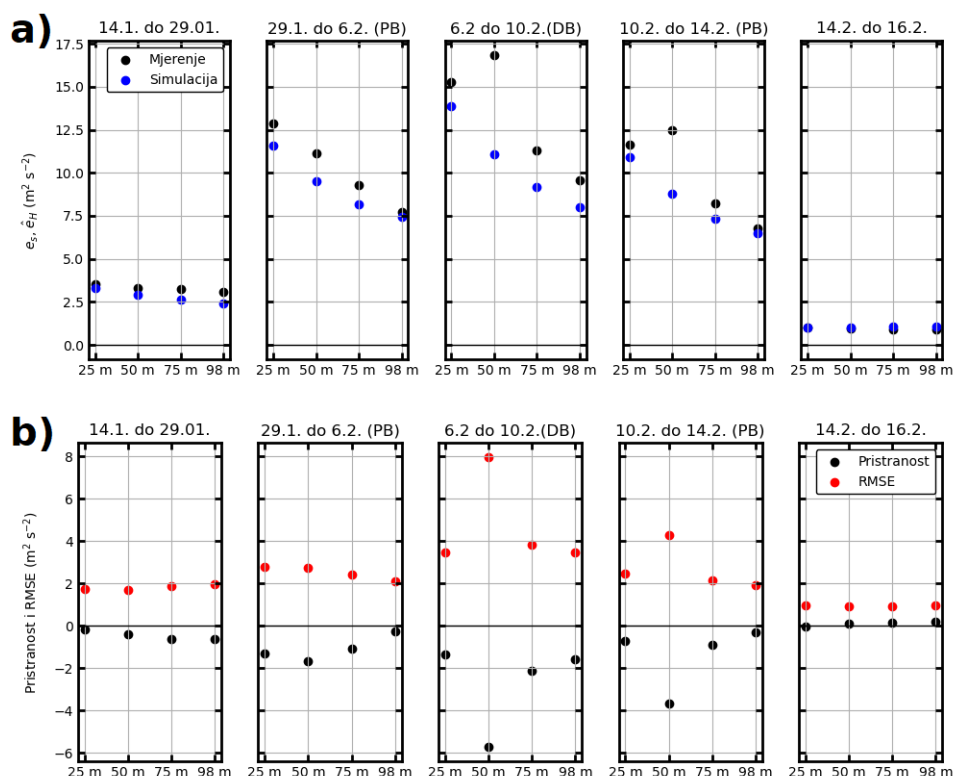
$\mu_U \sigma_\theta \gg \sigma_U$, tj. prisutna je nestacionarnost smjera vjetra, što ukazuje na submezoskalna gibanja poput meandriranja ili katabatičkih strujanja. Navedena gibanja su česta kod manjih brzina vjetra i izražene statičke stabilnosti, tj. uvjetima u kojima su parametrizacije prizemnog sloja atmosfere u brdovitom terenu često neprikladne (npr. Grisogono i sur. 2007).

Tablica 9: RMSE, pristranost i koeficijent korelacije između \hat{e}_H i e_s . Vrijednosti u zagradama na 50 m predstavljaju vrijednosti prije 7. veljače (tj. prije kvara vjetrulje).

| | RMSE ($\text{m}^2 \text{s}^{-2}$) | Pristranost ($\text{m}^2 \text{s}^{-2}$) | Koef. korelacije |
|------|-------------------------------------|--|------------------|
| 25 m | 2,70 | -0,82 | 0,90 |
| 50 m | 3,72 (2,37) | -2,21 (-1,12) | 0,83 (0,88) |
| 75 m | 2,53 | -0,98 | 0,85 |
| 98 m | 2,42 | -0,52 | 0,80 |



Slika 22: Usporedba procjene horizontalne komponente TKE (\hat{e}_H) na tornju u zaleđu Rijeke (Poglavlje 4.1.1) i simulirane TKE (e_s) u točki numeričke mreže modela najbližoj tornju. Crvenom linijom je prikazana 1-h klizna usrednjena vrijednost \hat{e}_H .



Slika 23: (a) Usrednjene vrijednosti i (b) pristranost i RMSE e_s i \hat{e}_H u različitim periodima puhanja bure. Prikazani su isti podaci kao na Slici 22.

5.2.4 Diskusija i osvrt

Ispitana je točnost numeričkog modela WRF-ARW pri simulaciji vertikalnih profila usrednjenih vrijednosti brzine i smjera vjetra, kao i TKE, iznad brdovitog terena sjevernog dijela Dinarida. Za validaciju simulacije su korišteni podaci prikupljeni na 100-m tornju u zaleđu Rijeke s anemometrima na 5 visina, od 25 m do 100 m iznad tla. Anemometrima su mjereni brzina i smjer horizontalnog vjetra uz frekvenciju uzorkovanja 1 Hz, pri čemu su sačuvane 10-min usrednjene vrijednosti i standardne devijacije brzine i smjera vjetra. Standardne devijacije brzine i smjera vjetra su omogućile procjenu horizontalne komponente TKE. Izuzimajući avionska ili daljinska (sodarska, lidarska) mjerenja, ovo predstavlja in situ mjerenja brzine vjetra i turbulencije bure na dosad najvećoj visini u prizemnom sloju atmosfere. Zbog utjecaja reljefa na značajke turbulencije bure, horizontalni korak numeričke mreže u najgušćoj mreži je 0,3 km te je korišten digitalni model terena razlučivosti 1 lučne sekunde (NASA 2019). Simulacija je provedena za iznimno dugačak niz uzastopnih jakih do orkanskih bura u siječnju i veljači 2012. godine, a kojeg su mjerni uređaji na tornju zabilježili u cijelosti. Događaj je trajao više od tri tjedna (Kuzmić i sur. 2015), a mjerni uređaji su

zabilježili cjelokupan period uključujući početak, jačanje, prijelaz iz plitke u duboku buru, te naposljetku završetak, što je omogućilo detaljnu usporedbu rezultata mjerenja i simulacije.

Podudaranje usrednjene vrijednosti brzine i smjera vjetra u simulaciji i mjerenjima je vrlo dobro. Azimut smjera vjetra od $\sim 60^\circ$ je točno modeliran na svim visinama, izuzev početka i kraja mjerenja te na visini od 50 m zbog kvara vjetrulje. S obzirom na podudaranje simulacije i mjerenja, mogu se izdvojiti tri perioda puhanja bure:

- dominantan period plitke bure (PB) u opsegu $\sim 60\%$ vremenskog niza,
- kratak, trodnevni period s dubokom (DB) burom i
- stadij početka i kraja događaja.

Tijekom PB, pristranost usrednjene vrijednosti brzine vjetra gotovo iščezava, a RMSE iznosi 10–15%. Tijekom DB, RMSE raste na 20–25%. Podudaranje je najlošije pri početku i kraju događaja (RMSE veća od 50 %). Uspoređujući odstupanje simulacije i mjerenja s usrednjenom vrijednosti brzine vjetra, postoji nagla promjena u odstupanju pri brzini $\sim 20 \text{ m s}^{-1}$. Iako je podudaranje brzine vjetra općenito vrlo dobro na svim visinama, simulacija na najnižoj visini pokazuje lokalni maksimum (prizemna mlazna struja) koji u mjerenjima nije prisutan.

Usporedba simuliranih (e_s) i izmjerenih profila TKE je provedena na temelju usrednjene vrijednosti i standardne devijacije brzine i smjera horizontalnog vjetra (jednadžba 5.8 i Dodatak A1). Mjerenja nisu uključivala vertikalnu komponentu brzine, pa se očekuje da je procijenjena TKE (\hat{e}_H , tj. njena horizontalna komponenta) manja od iznosa koji uključuje sve tri komponente brzine. Kao za usrednjenu vrijednost brzine vjetra, podudaranje e_s i \hat{e}_H pokazuje ovisnost o periodu puhanja bure, s većim odstupanjem tijekom DB te najvećim odstupanjem pri početku i kraju događaja. RMSE e_s i \hat{e}_H iznosi $\sim 20\%$ i $\sim 25\text{--}30\%$ tijekom, redom, PB i DB, te do 100% pri početku i kraju događaja. Čak i s ovim odstupanjima, krivulje e_s i \hat{e}_H su vrlo slične.

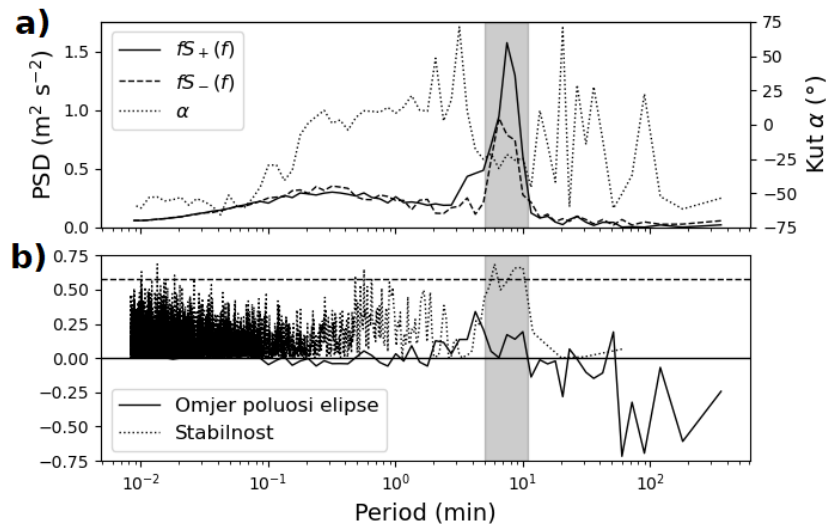
Usporedba postignutih rezultata s prethodnim simulacijama provedenim uz bitno veći korak mreže (Belušić i Klaić 2006; Simić 2019) naglašava ključnu ulogu gustoće mreže u prikazu reljefa. Manja točnost simulacije tijekom DB je u skladu s opažanjima na južnoj obali Jadrana (Keresturi 2014). Postignuti rezultati su usporedivi s prethodnim simulacijama provedenim uz približno jednak korak mreže (Večenaj i sur. 2019).

5.3 Rotacijske značajke pulsacija bure

5.3.1 Opće značajke

Rezultati u poglavljima 5.3.1–5.3.3 se temelje na Golem i sur. (2024). Vremenski niz događaja bure zabilježen u Senju od listopada 2004. do lipnja 2005. godine je podijeljen na periode duljine 6 h (Poglavlje 4.2.2). Rotacijski spektri i pripadajuće rotacijske značajke (metoda RSA; Poglavlje 4.3.3) su izračunati za sve 6-h periode koji su bili kvazistacionarni, tj. kod kojih je promjena usrednjene vrijednosti smjera vjetra manja od 10° i za koje su pulsacije bile prisutne kroz čitav period. Pulsacije u ovim periodima su obilježene većom koherentnosti, tj. većom vrijednošću parametra stabilnosti. Odabrano je ukupno 40 6-h perioda, a u svakom periodu su izračunati spektri gustoće snage pozitivne (S_+) i negativne (S_-) rotacijske komponente, kut (α) koji glavna poluos elipse zatvara s x -osi (tj. prema istoku), stabilnost (E) i omjer glavne i sporedne poluosi elipse (R_{ab}). Tumačenje rotacijskih značajki i opis RSA dan je u Poglavlju 4.3.3, a primjer rotacijskih spektara i rotacijskih značajki prikazan je na Slici 24.

Navedene rotacijske značajke su funkcije frekvencije. Kako bi svakom 6-h periodu bio pridružen jedan skup brojeva koji opisuje rotacijske značajke čitavog perioda, parametri su usrednjeni u rasponu frekvencija na kojem se pulsacije pojavljuju; na Slici 24 to su frekvencije koje odgovaraju periodima od 5 do 10 min. U kasnijim poglavljima se koriste klizni rotacijski spektri koji su funkcije vremena i frekvencije; u tom slučaju rotacijske značajke su usrednjene između dvaju perioda, rezultat čega je funkcija isključivo vremena. Rotacijski spektri izračunati su na dva načina. U prvom, spektri dobiveni brzom Fourierovom transformacijom su usrednjeni sa 16 točaka po dekadi. U slučaju stabilnosti E , ova metoda nije statistički pouzdana za niske frekvencije (reda veličine $1/6 \text{ h}^{-1}$), tj. rasponu frekvencija na kojem se pulsacije pojavljuju. Rotacijski spektri su zato također izračunati metodom (Welch 1967) s preklapanjem od 50% i duljinom prozora od 1 h, nakon čega je izračunat E .

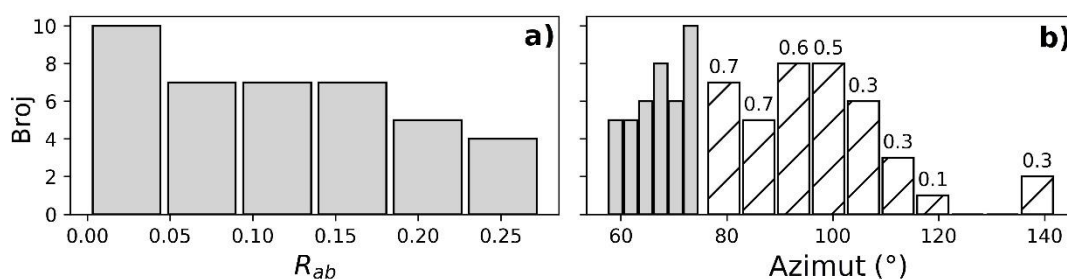


Slika 24: Primjer rotacijskih spektara i rotacijskih značajki izračunatih za 6-h period na tornju u Senju (Poglavlje 4.1.2 i Slika 5) u noćnim satima 2. lipnja 2005. godine. (a) frekvencijom otežani spektri rotacijskih komponenti i α . (b) R_{ab} i stabilnost. Isprekidana horizontalna linija predstavlja 95%-nu razinu pouzdanosti za stabilnost.

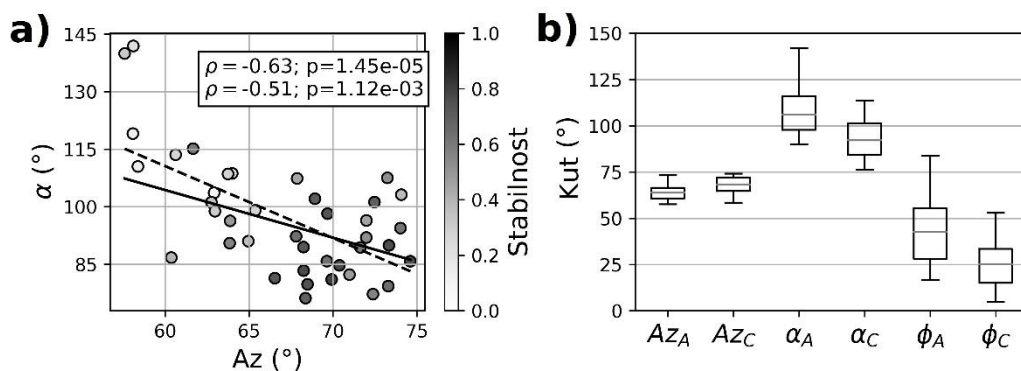
Raspodjele R_{ab} , α i azimuta prizemnog vjetera (Az) su prikazane na Slici 25. Pozitivna rotacijska komponenta je gotovo uvijek veća od negativne, pa je u pravilu $R_{ab} > 0$. Apsolutna vrijednost je relativno mala, što znači da je struktura pulsacija pravocrtna ili eliptična s visokim ekscentricitetom. Budući da je $R_{ab} > 0$, vektor brzine na frekvenciji pulsacija ocrta ovu elipsu u pozitivnom smjeru (suprotno od kazaljke na satu). S obzirom na kut α , budući da je kretanje česti zraka na frekvenciji pulsacija približno pravocrtno, α se može tumačiti kao orijentacija pravca ili izdužene elipse duž koje čest oscilira (Poglavlje 4.3.3; Slika 10). Vrsta gibanja na frekvencijama pulsacija približno odgovara onima u sredini ili na desnoj strani Slike 10. Nadalje, α nije jednak Az (Slika 25b). Medijan Az iznosi $\sim 70^\circ$, dok je raspodjela α šira, s medijanom od $\sim 100^\circ$. Prema tome, dok je prizemni vjetar približno sjeveroistočni, α je istočniji, ponekad i jugoistočan. Nadalje, pulsacije s većim α imaju u prosjeku manju vrijednost parametra stabilnosti (Slika 26a) i malo veći R_{ab} , što znači da su pulsacije s većim kutem između α i Az manje koherentne i „kružnije“ (korelacija α i R_{ab} je 0,46, a $p = 0,003$). Ova promjena relativnog kuta između α i Az uzrok je promjenjivog odnosa lateralne i longitudinalne amplitude pulsacija opisane u Poglavlju 1.4.

Azimet strujanja koje nailazi na Dinaride ovisi o sinoptičkom tipu vremena, pa je razumno očekivati da neke rotacijske značajke o njemu ovise. Periodi duljine 6 h su svrstani metodom

opisanom u Dodatku A2 (Poje 1965) kao ciklonalni ili anticiklonalni te je razlika u raspodjeli značajki prikazana na Slici 26b. Kako bi se smanjio utjecaj perzistencije, značajke vremenski uzastopnih perioda su usrednjene (osim kod promjene sinoptičkog tipa bure). Anticiklonalna bura ima u prosjeku manji Az te veći α , što znači da je i njihov relativan kut (ϕ) veći. Dvije ekstremne vrijednosti ϕ (Slika 26a) su zapažene upravo tijekom anticiklonalne bure. Ovu razliku u raspodjelama treba uzeti uvjetno jer Kolmogorov-Smirnovljevim ispitom nehomogenosti (Hodges 1958) nije isključena nulta hipoteza – da nema razlike u rotacijskim značajkama za dva sinoptička tipa bure – na razini od 5% ($p = 0,07$ za smjer prizemnog vjetra, 0,14 za α i njihov relativni kut). Moguće je dakle da je ova razlika rezultat nedovoljno velikog uzorka.



Slika 25: (a) Raspodjela R_{ab} . (b) raspodjele Az (sivo) i α (crtkano). Usrednjena stabilnost (E) je označena iznad svakog stupca histograma. Kut α je izražen kao azimut (tj. u odnosu na sjever).



Slika 26: (a) Dijagram raspršenja Az , α i E . (b) raspodjele Az , α i njihova relativnog kuta (ϕ) za ciklonalne (C) i anticiklonalne (AC) bure. Isprekidana (puna) linija na lijevoj slici je linearna prilagodba s (bez) dvije točke u gornjem lijevom kutu koje se mogu smatrati izuzecima. Naznačeni su i koeficijenti korelacije i p -vrijednosti za punu (gornja vrijednost) i isprekidanu liniju (donja vrijednost).

Az i α su negativno korelirani (Slika 26a), što znači da kad Az raste (tj. prizemni vjetar zakreće u smjeru kazaljke na satu), α se smanjuje (tj. elipsa se zakreće u suprotnom smjeru) i obrnuto. Posljednji detalj može pomoći pri određivanju uzroka nastanka pulsacija.

5.3.2 Promjena rotacijskih značajki u događaju bure

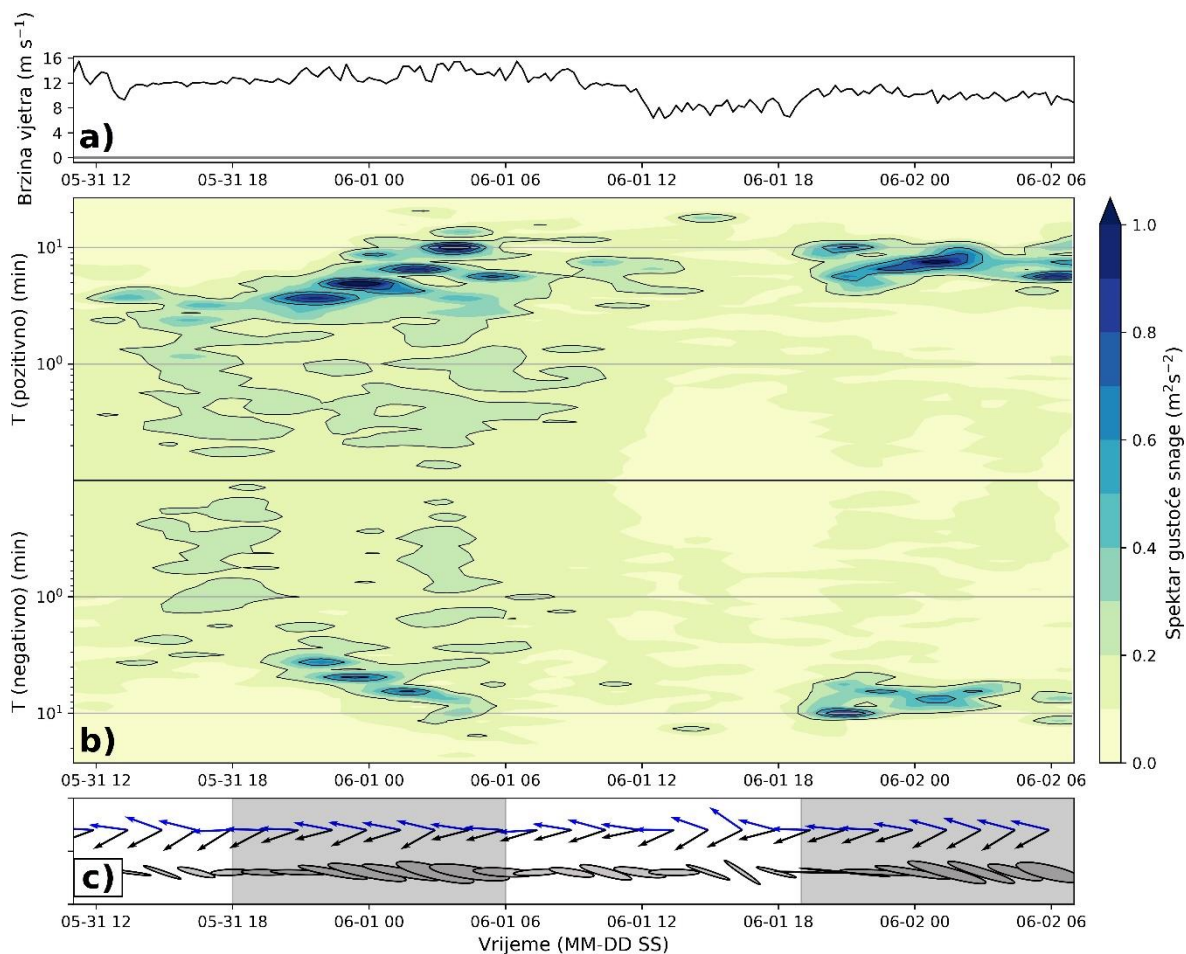
Vrijedi pogledati promjenu rotacijskih značajki tijekom događaja bure. Izračunao sam klizne rotacijske spektre dvaju odabranih događaja bure s jakim pulsacijama (Slike 27 i 28). Širina kliznog prozora na kojem su spektri računati je 6 h, a korak pomaka je 30 min (za Sliku 28 širina prozora je 3 h, a pomak je 15 min).

Slika 27 prikazuje događaj s kraja svibnja i početka lipnja 2005. godine. Pozitivna rotacijska komponenta je veća od negativne, ali njihova relativna snaga ovisi o frekvenciji te se mijenja u vremenu. Na primjer, pulsacije perioda ~ 10 min imaju 1. lipnja u 03 UTC znatno veću pozitivnu rotacijsku komponentu, ali 18 h kasnije, u 21 UTC, dvije komponente su podjednake. Ovo znači da se gibanje pulsacija mijenja iz eliptičnog u pravocrtni oblik. Na Slici 10 to odgovara prijelazu iz središnje na desnu sliku. S ciljem prikaza vremenske promjenjivosti, svakoj je slici priložen dijagram elipsa koji prikazuje snagu i ekscentricitet pulsacija, kao i odnos između prizemnog smjera vjetra (Az) i orijentacije osi oscilacije (α). Snaga pulsacija je dana duljinom velike poluosi koja je približno proporcionalna zbroju energije dvaju rotacijskih komponenti, tj. brojniku jednadžbe (4.6). Ekscentricitet elipse je opisan pomoću R_{ab} (jednadžba 4.6); što je R_{ab} manji to su pulsacije pravocrtnije i obratno, što je veći to je pripadajuća elipsa „deblja“. Kako je dijagram elipsa funkcija vremena, a klizni rotacijski spektri su funkcije vremena i frekvencije, svi parametri korišteni za prikaz elipsa (spektri gustoće energije rotacijskih komponenti S_+ , S_- , kao i R_{ab} i α ; Poglavlje 4.3.3) su prvo usrednjeni u pripadajućem rasponu frekvencija. Za Sliku 27 su to frekvencije koje odgovaraju periodima od 3 do 11 min, a za Sliku 28 periodima od 5,5 do 8,5 min. Ovo usrednjavanje je slično načinu na koji su u Poglavlju 5.3.1 za svaki 6-h period izračunate jedinstvene vrijednosti rotacijskih značajki. Promjena graničnih frekvencija nije značajnije utjecala na vrijednost R_{ab} i α , ali jesu utjecale na ukupnu rotacijsku energiju (širi raspon perioda smanjuje S_+ i S_-).

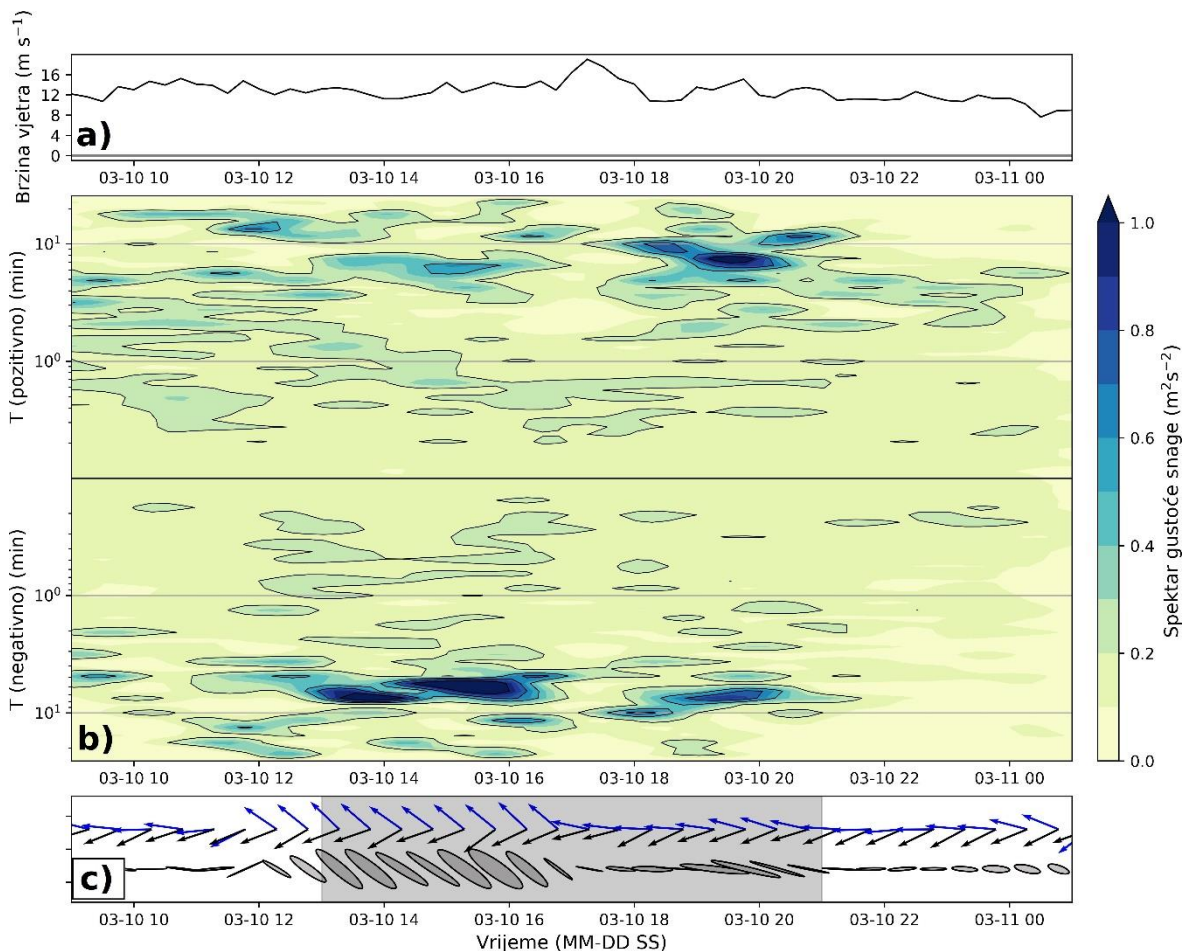
Slika 27 također prikazuje odnos Az i α . Pulsacije osciliraju duž pravca u smjeru osi SZ–JI, tj. pod kutem u odnosu na prizemni vjetar. U noći s 1. na 2. lipnja (od ~ 19 UTC do ~ 06 UTC) se može primijetiti razilaženje dvaju smjerova (α i Az), tj. ova dva smjera su negativno korelirana

(slično kao na Slici 26a). U ovom slučaju prizemni vjetar okreće prema JZ, a α prema SZ. Razilaženje je prisutno i u drugim događajima bure s jakim pulsacijama. Pulsacije su u ovom događaju bure prisutne samo noću i rano ujutro, a moguć uzrok je povećana noćna temperaturna razlika mora i kopna koja može uzrokovati dodatni mezoskalni gradijent tlaka zraka (Gohm i Mayr 2005a, b).

Slika 28 prikazuje rijedak slučaj s većom negativnom rotacijskom komponentom. Pulsacije u ovom slučaju naglo mijenjaju smjer osi oscilacije (od JI na I), nakon čega prevladava pozitivna komponenta. Karakter gibanja prije ~17 UTC je izražen eliptičan, što se podudara sa zapažanjem da pulsacije većeg R_{ab} imaju i veći kut između Az i α (Poglavlje 5.3.1).



Slika 27: (a) 15-min usrednjena vrijednost brzine vjetra. (b) frekvencijom otežani klizni rotacijski spektri pozitivne i negativne rotacijske komponente. Gornja (donja) polovica je pozitivna (negativna) rotacijska komponenta. Os ordinata (tj. period T) je zrcaljena oko središnje linije. (c) dijagram elipsa; α (plave strelice) i 15-min usrednjena vrijednost Az (crne strelice). Sivom bojom su osjenčani periodi s pojačanim pulsacijama. Vrijeme je dano u UTC.



Slika 28: Isto kao i na Slici 27, ali za 12 h unutar događaja bure u ožujku 2005. godine.

5.3.3 Diskusija

Tri pitanja se postavljaju kao rezultat zapažanja u Poglavljima 5.3.1 i 5.3.2:

- što upravlja orijentacijom osi oscilacije α ,
- zašto su α i A_z negativno korelirani,
- zašto je izraženija rotacija pulsacija u pozitivnom smjeru?

Kut α ovisi o uzroku nastanka pulsacija, pri čemu su trenutno poznata tri (Poglavlje 3.6). Smatram da se naginjanje osnovne vrtložnosti planinskog vala može isključiti jer je struktura pulsacija nastala ovim uzrokom izotropna u horizontalnoj ravnini te nije valnog karaktera (Poglavlje 3.2; Clark i Farley 1984). U tom slučaju bih očekivao $|R_{ab}| \gg 0$ i nisku vrijednost stabilnosti, što uglavnom ne odgovara opaženim značajkama (Slike 25, 26). S druge strane, ovaj uzrok daje objašnjenje za prevladavajući smjer rotacije pulsacija. Naime, prema jednadžbi (3.6) i Slici 3 (Poglavlje 3.2), tranzijentni horizontalni vrtlozi mogu biti uzrokovani međudjelovanjem osnovne vrtložnosti planinskog vala i gradijenta vertikalne brzine u smjeru paralelnom osi planine. Za lateralno homogenu planinu (daleko od rubova) je razumno

pretpostaviti da ovakvi vrtlozi nemaju prevladavajući smjer rotacije, ali to ne bi bio slučaj za stvarnu, lateralno heterogenu planinu. Prema ovom scenariju, lokalna obilježja terena bi uzrokovala istovremeno djelovanje gradijenta vertikalne brzine i osnovne vrtložnosti lomećeg vala (jednadžba 3.6; Slika 3) koje bi uzvodno od Senja uzrokovalo nastanak vrtloga pozitivnog horizontalnog smjera rotacije. Usprkos ovome, smatram da su argumenti R_{ab} i stabilnosti dovoljni da se ovaj uzrok isključi, barem za većinu podataka koji su ovdje prikazani (izuzev nekoliko perioda s niskom stabilnošću na Slici 25b).

KHN i PZV prikladniji su za objašnjenje opaženih rotacijskih značajki. Oba fenomena spadaju u valna gibanja pod utjecajem sile uzgona i inercije (Poglavlje 3.2). Za općeniti inercijsko-uzgonski val vrijedi sljedeći izraz između linearnih perturbacija horizontalnih komponenti brzine vjetra (npr. Gossard i Hooke 1975)

$$u' = \frac{\omega k + ifl}{\omega l - ifk} v', \quad (5.9)$$

gdje je f Coriolisov parametar, ω je Doppler-pomaknuta kružna frekvencija, k i l su, redom, zonalna i meridionalna komponenta valnog vektora (\vec{k}), a i je imaginarna jedinica. Za valna gibanja kratkih perioda (tj. $\omega \gg f$) vrijedi $u'/v' \approx k/l$, što znači da nema rotacije u horizontalnoj ravnini (tj. očekuje se $R_{ab} \approx 0$). Mala vrijednost R_{ab} je upravo ono što je i opaženo u prethodnim poglavljima (Slika 25a). Za nestabilne KH valove ovo vrijedi samo do trenutka prijelaza u 3D turbulenciju.

Za nestabilne KH valove je rast najbrži za valove čiji je vektor \vec{k} paralelan smjeru vertikalnog smicanja horizontalnog vjetra ($\partial\vec{U}/\partial z$; \vec{S} od sada nadalje; Haurwitz 1947). Ovi valovi brzo prerastu one za koje to nije slučaj pa se očekuje da su vrhovi i doline vala orijentirani okomito na smjer vektora \vec{S} (Metcalf i Atlas 1973). U slučaju PZV, vektor \vec{k} također ima prevladavajuću orijentaciju u smjeru \vec{S} (tzv. Wegenerova hipoteza; npr. Gossard i Hooke 1975). Zbog ovih sličnosti je na temelju prizemnih mjerenja teško razlikovati ova dva uzroka nastanka pulsacija i moguće je da su oba istovremeno prisutna.

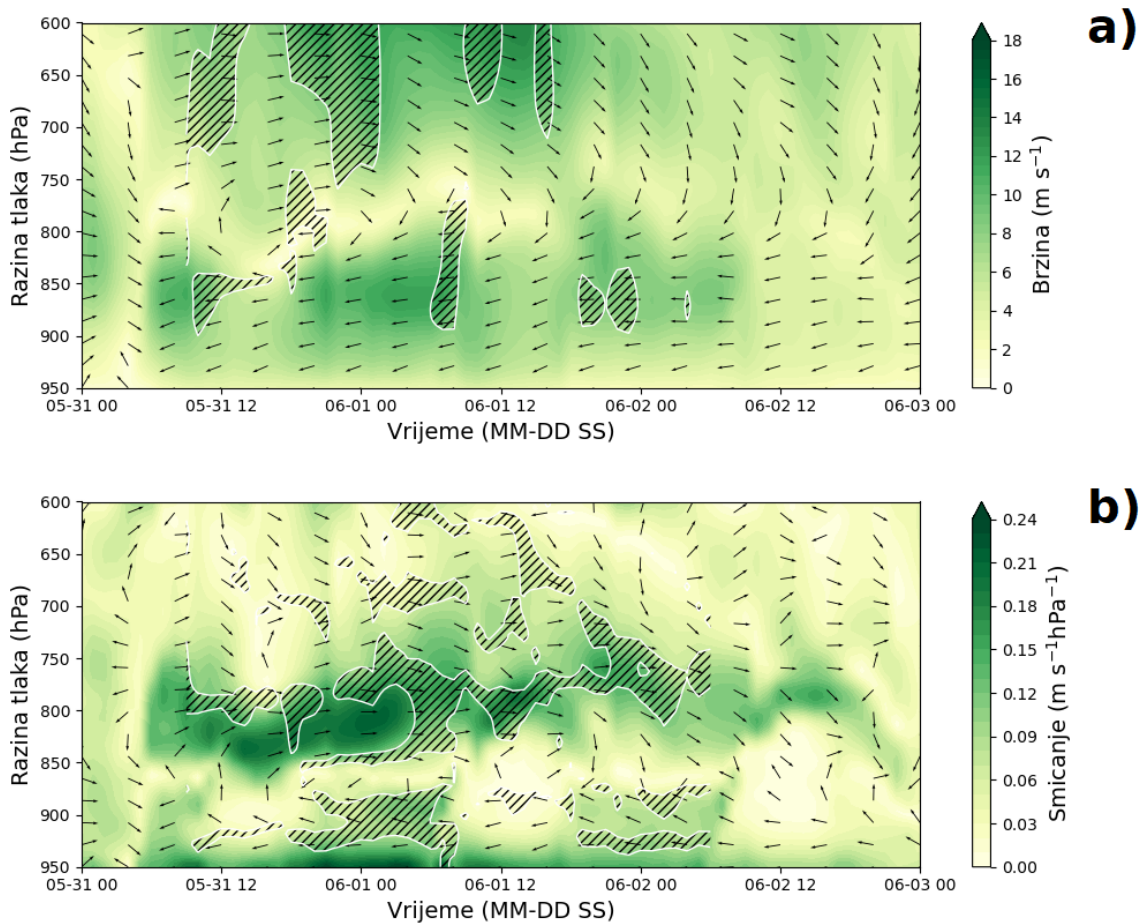
U slučaju kad KHN ili PZV potiču nastanak pulsacija se očekuje da je α jednak smjeru vektora smicanja. Lokalne sondaže ili lidarska mjerenja nisu dostupni pa se za provjeru ove tvrdnje koristi ERA5 reanaliza (Hersebach i sur. 2020) Europskog centra za srednjoročnu vremensku prognozu (ECMWF). Tumačenje rezultata treba uvjetno prihvatiti jer je horizontalni korak

mreže ERA5 podataka oko 20 km u umjerenim geografskim širinama, a teren oko Senja je brdovit. Podatke sam uzeo iz najbliže točke mreže uzvodno od Senja (45°N, 15°E). Ako u vremensko-vertikalnim profilima brzine vjetra postoji razina na kojoj je odstupanje α i smjera \vec{S} maleno ili iščezava, onda to ukazuje na propagaciju vala na toj razini. Kao mjerilo odstupanja α i smjera smicanja (ili brzine) vjetra, definiram

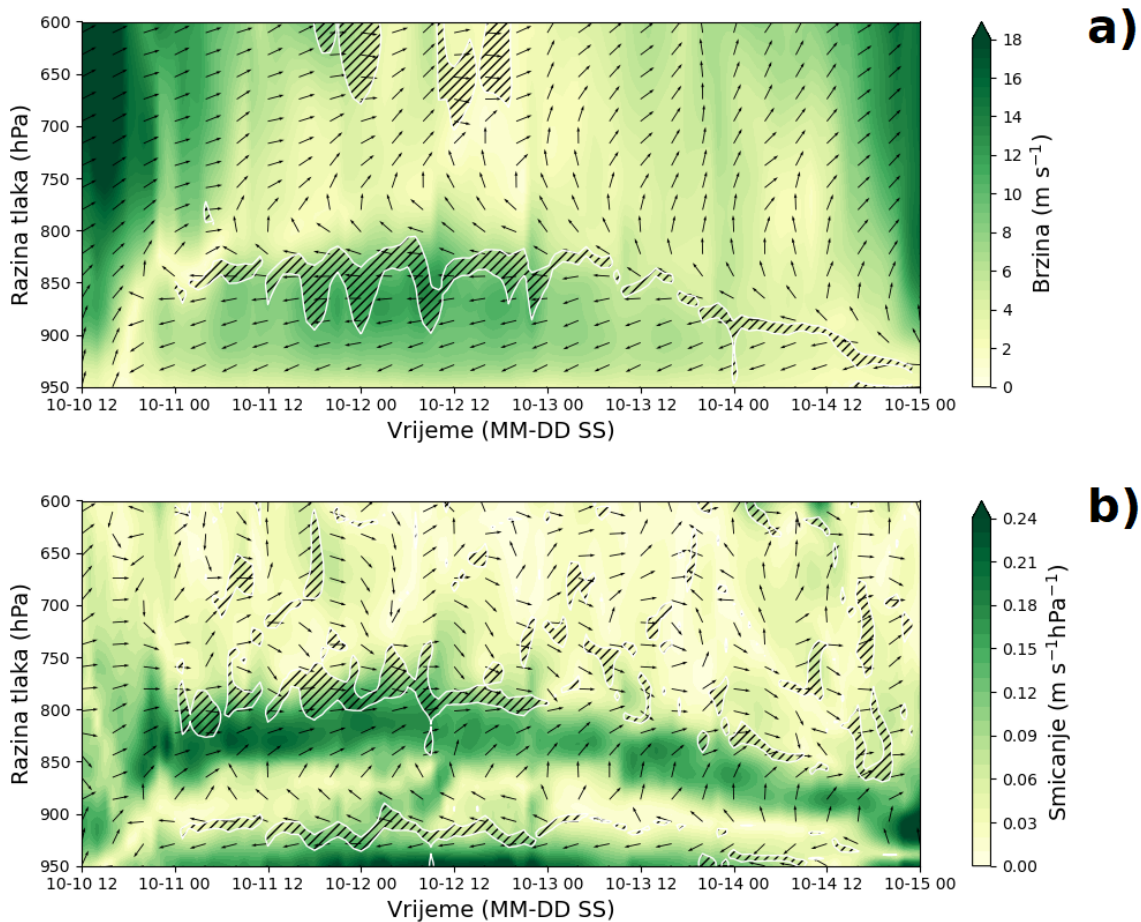
$$d(\alpha, \beta) = \sqrt{1 - |\cos \phi|}, \quad (5.10)$$

gdje je ϕ kut između α i proizvoljnog smjera β (u ovom slučaju to je smjer vektora smicanja ili vektora horizontalne brzine vjetra). Odstupanje iščezava za $\alpha = \beta$ ili $\alpha = \beta + 180^\circ$.

Slika 29 prikazuje profile vektora brzine vjetra (Slika 29a), vektora smicanja (Slika 29b) i odstupanje d (jednadžba 5.10) potonjih i smjera osi oscilacije pulsacija izmjenenog u Senju. Prikazan je isti događaj bure kao na Slici 27. Ovo znači da se α izmjeren na tornju u Senju uspoređuje sa smjerom vjetra ili smjerom smicanja duž čitavog vertikalnog profila. Na vrhu sloja bure se nalazi kritična razina, a iznad nje vjetar okreće na Z ili SZ. Unutar sloja bure postoje dvije razine na kojima je $d = 0$, jedna u donjem dijelu i druga u gornjem dijelu strujanja (redom, 920 hPa i 850–775 hPa). Na donjoj razini d iščezava u objema noćima od 18 UTC do 06 UTC, upravo u vrijeme kada su pulsacije prisutne. Razine iznad ~775 hPa ne uzimaju se u obzir jer kritična razina predstavlja prepreku valovima koji se gibaju odozgo prema dolje. Slika 30 prikazuje događaj bure iz listopada 2004. godine. Kao na Slici 29, α se podudara sa smjerom \vec{S} na vrhu i dnu sloja bure. U ovom slučaju se smjer vjetra na vrhu sloja bure također podudara s α , vjerojatno zato što su \vec{S} i vektor brzine vjetra paralelni. Opažanje da je α jednak smjeru \vec{S} konzistentno je, dakle, s KHN ili PZV kao uzrocima nastanka pulsacija.

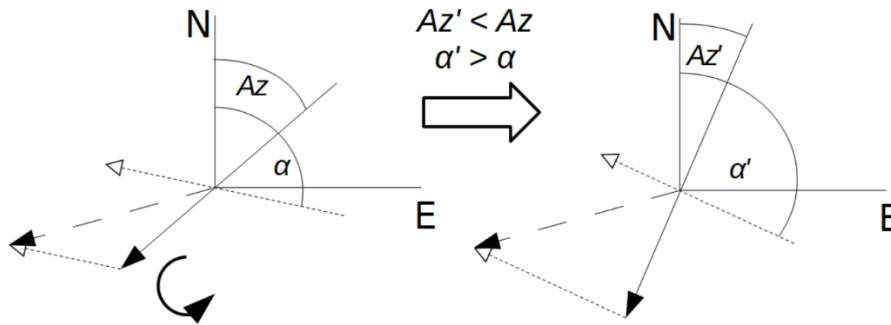


Slika 29: Vremensko-vertikalni presjeci ERA5 (a) vektora brzine i (b) vektora smicanja za događaj bure na kraju svibnja i početku lipnja 2005. godine. Kosim crtama je osjenčano područje za koje je odstupanje d (jednadžba 5.10) smjera brzine ili smicanja na toj visini i α izmjerenog u Senju unutar 8° . Profili brzine i smicanja su iz točke ERA5 mreže najbliže Senju.



Slika 30: Isto kao na Slici 29, ali za slučaj iz listopada 2004. godine. Pulsacije su prisutne od 11. listopada, 12 UTC do 13. listopada, 18 UTC.

Kolinearnost smjera vektora smicanja i α također može objasniti opaženu negativnu korelaciju smjera prizemnog vjetra (Az) i α (Slika 26a). Ako je smjer vjetra iznad sloja smicanja nepromjenjiv, onda zakretanje Az u jednom smjeru uzrokuje zakretanje vektora smicanja u suprotnom smjeru, što zakreće orijentaciju vrhova i dolina, tj. orijentaciju vektora \vec{k} (Slika 31). Isto se događa ako je smjer prizemnog vjetra nepromjenjiv, a zakreće se vjetar na visini.



Slika 31: Shematski prikaz utjecaja promjene smjera prizemnog vjetra (Az) na orijentaciju vrhova i dolina KH i ZP valova. Puna strelica označava vektor prizemnog vjetra, a isprekidana strelica označava vjetar na nekoj visini. Vektor smicanja između te dvije visine označen je praznom strelicom. Ako je vjetar na visini nepromjenjiv, pozitivno zakretanje prizemnog vjetra ($Az' < Az$) uzrokuje negativno zakretanje vektora smicanja ($\alpha' > \alpha$). N i E označavaju osi usmjerene prema, redom, sjeveru i istoku.

5.3.4 Uzrok horizontalne rotacije pulsacija

Karakteristično gibanje česti zraka na frekvenciji pulsacija je oscilacija duž pravca ili izdužene elipse orijentirane duž vektora smicanja. Ove značajke su u skladu s KHN ili PZV kao uzrocima nastanka pulsacija. Smatram da KHN i PZV ipak ne nude zadovoljavajuće objašnjenje za prevladavajući pozitivni smjer rotacije (barem s ovdje dostupnim podacima). Idealizirani KH i ZP valovi, naime, nemaju prevladavajući smjer rotacije u horizontalnoj ravnini (Poglavlje 3.2 i 5.3.3), barem ne iznad ravnog terena.

Prevladavajući smjer rotacije na frekvenciji pulsacija se može promatrati kroz dinamiku vertikalne komponente vrtložnosti (ζ). Ako se linearne perturbacije horizontalnih komponenti brzine vjetra (u' i v') mogu približno opisati ravnim putujućim valovima, vrijedi

$$\zeta' = \frac{\partial v'}{\partial x} - \frac{\partial u'}{\partial y} = i(kv' - lu'), \quad (5.11)$$

gdje je ζ' linearna perturbacija ζ na određenoj frekvenciji. U slučaju pravocrtnog gibanja, v'/u' je jednak l/k (Poglavlje 5.3.3) pa ζ' iščezava, što je isti uvjet pod kojim R_{ab} iščezava (Slika 10). Može se pokazati da, ako postoji fazni pomak između u' i v' , tj. ako je v'/u' kompleksan broj, tada slijedi da je $|R_{ab}| > 0$, a veće vrijednosti R_{ab} znače i veću vrtložnost (Dodatak A3). Proučavanje ζ moglo bi stoga dati odgovor na pitanje prevladavajućeg smjera rotacije pulsacija u horizontalnoj ravnini, iako treba naglasiti da jednadžba (5.11) strogo vrijedi samo za slučaj ravnog, putujućeg vala.

Pregled literature ukazuje na nekoliko uzroka nastanka vrtložnosti u zavjetrini planinskih vrhova. Isprva se smatralo da vrtložnost nastaje isključivo trenjem u AGS-u na rubovima planine (npr. Brighton 1978); ovaj način odgovara članu V jednadžbe (3.6). Smolarkiewicz i Rotunno (1988) su pokazali da ζ može nastati naginjanjem lateralne komponente vrtložnosti (član III jednadžbe 3.6). Lateralna vrtložnost (η) nastaje baroklinom deformacijom osnovnog strujanja oko planine ili deformacijom već postojeće η zbog prisustva smicanja u strujanju. Schär i Smith (1993) i Schär i Durran (1997) su se usredotočili na nelinearnu disipaciju valne energije u hidrauličkim skokovima ili području loma planinskog vala, pokazavši da ζ nastaje na rubovima ovih područja nakon čega se advektira nizvodno u dugačkim „repovima“. Disipaciju su parametrizirali kao trenje unutar hidrauličkog skoka ili područja loma planinskog vala, tj. za nastanak ζ zadužen je član V jednadžbe (3.6). Prema Grubišić (2004) i Belušić i Klaić (2006), ovaj uzrok uobičajen je kod nastanka kvazistacionarnih repova vrtložnosti u zavjetrini Dinarida. Rotunno i Bryan (2020) promatraju vremenski promjenjiva polja ζ u zavjetrini planine te zaključuju da je disipacija posljedica nelinearnog, nestacionarnog naginjanja lateralne komponente vrtložnosti, tj. člana III koji se vremenskim usrednjavanjem može parametrizirati kao član V. Ovo je isti uzrok kojeg Clark i Farley (1984) predlažu za nastanak pulsacija (Poglavlje 3.2). Rotunno i Bryan (2020) nisu opazili KHN, ali naglasak na nestacionarnom polju vrtložnosti (u suprotnosti s navedenim radovima koji su se usredotočili na vremenski usrednjena polja) čini ovaj rad posebno bitnim.

Za usporedbu vertikalne komponente vrtložnosti i horizontalnih rotacijskih značajki pulsacija su provedene numeričke simulacije. Uspješna simulacija rotacijskih značajki u Senju omogućuje proučavanje njihovih prostornih raspodjela i povezanosti s poljem ζ . Drugo pitanje tiče se orijentacije vektora smicanja (\vec{S}), tj. ako \vec{S} uvjetuje orijentaciju osi oscilacije (α), što utječe na \vec{S} ? Smatram da je orijentacija usjeka u planinskom grebenu bitan faktor. Usporedbom Slike 5 i Slike 25b primjećuje se da je orijentacija α približno jednaka orijentaciji usjeka Vratnik–Senj (istok–zapad). Usjeci bi usmjeravanjem strujanja utjecali na lokalnu orijentaciju \vec{S} , pa time i na α . Sljedeća tri potpoglavlja (5.3.5–5.3.7) sadrže, redom, opis numeričke simulacije, usporedbu izmjerene brzine i smjera vjetra te rotacijskih značajki u Senju sa simuliranim te usporedbu polja ζ sa prostornim raspodjelama rotacijskih značajki pulsacija.

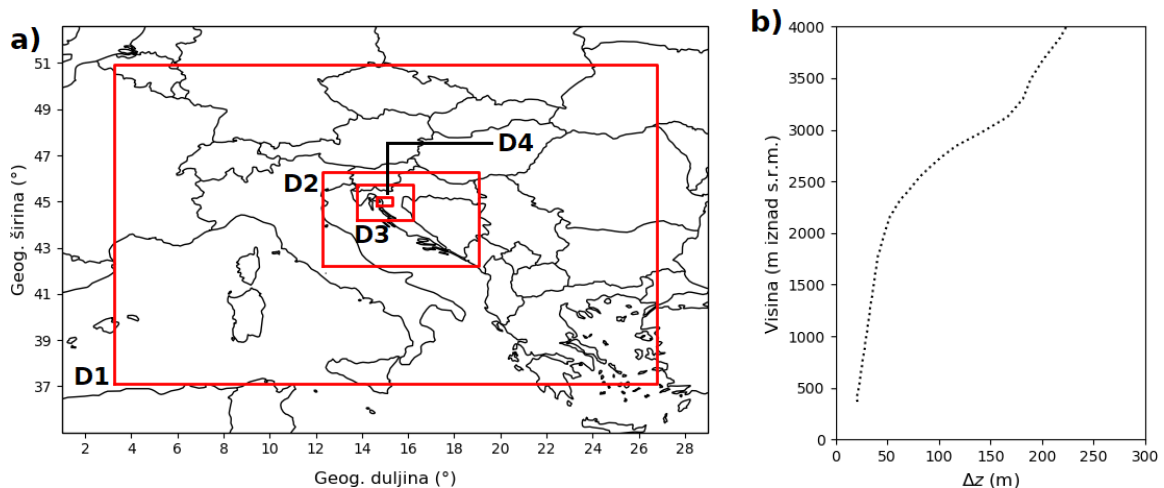
5.3.5 Opis događaja i postavke numeričkog modela

Analizirani događaj bure je isti kao na Slikama 27 i 29. Počevši s 31. svibnjem 2005. godine, Hrvatska se nalazila na prednjem dijelu visinskog grebena sa Z–SZ strujanjem na 500-mb plohi. Strujanje je dovelo istočni ogranak azorske anticiklone i svježiji zrak iznad zapadne i središnje Europe. Istovremeno, tlak iznad Jadrana bio je snižen. Sondaže iz Zagreba ukazuju na vjetar iz I–SI smjera u donjem dijelu atmosfere te naglu promjenu temperature, smjera i brzine vjetra na visini 800–700 mb. Prema tome, događaj bure bio je plitak s jasnom kritičnom razinom i inverzijom. Bura prestaje pomicanjem grebena i hladnog zraka prema istoku nakon 2. lipnja.

Za simulaciju rotacijskih značajki koristi se model WRF-ARW (verzija 4.3.3; Skamarock i sur. 2021) s 4 jednosmjerno ugniježdene domene koraka numeričke mreže od, redom, 9, 3, 1 i 0,2 km (Slika 32a). Ovo postavlja posljednju domenu u tzv. „sivu zonu“ gdje je turbulencija djelomično razlučena (npr. Honnert i sur. 2020). Domene dijele istu sigma-tlak vertikalnu mrežu sa 110 razina, od kojih je prvih 50 ispod 2 km iznad s.r.m. Vertikalna mreža je preuzeta iz Umek i sur. (2021) gdje je korištena za proučavanje KHN unutar dubokih alpskih kotlina. Pobuđivanje pulsacija ovisi o gustoći vertikalne mreže jer nedovoljno gusta mreža nije u stanju razlučiti gradijente brzine vjetra i potencijalne temperature između zaustavnog područja i NMS. Amplituda pulsacija ovisi o vertikalnom i horizontalnom koraku mreže (manji Δx i Δz povećavaju nestabilnosti), ali prevladavajući smjer rotacije i ostale rotacijske značajke o njima bitno ne ovise. Rubni uvjeti su zadani ERA5 reanalizom (Hersebach i sur. 2020), a mijenjani su svaka 3 h. Visina reljefa u domeni D4 je prikazana modelom ASTER (NASA 2019).

Odabrane parametrizacije fizikalnih procesa su prikazane u Tablici 10. Najvažnija razlika između domena D1–D3 i D4 jest da je u D4 korišten tzv. LES način rada, tj. transporti količine gibanja i topline odvijaju se isključivo preko (izotropnog) koeficijenta turbulentne difuzije (K_m). WRF raspolaže s dva oblika K_m primjerenih za LES način rada, shema prvog reda zatvaranja (Smagorinsky 1963) i tzv. 3D-TKE shema (Deardorff 1980). Odabrao sam 3D-TKE shemu, ali ispit osjetljivosti nije ukazao na značajnije razlike u rezultatima. Korištenje LES načina rada za korak mreže od 0,2 km uzrokuje određene pogreške (npr. Wyngaard 2004; Cuxart 2015; Honnert i sur. 2020), ali ovaj korak je potreban kako bi se smanjio utjecaj numeričkog prigušivanja vertikalnih gibanja koje je u kompleksnom terenu bilo pojačano radi numeričke stabilnosti. Bez isključivanja parametrizacija AGS-a, jako dugačak „zalet“ je potreban za pobuđivanje KHN, čak i za korak mreže od 100 m. Drugu mogućnost predstavlja

korištenje hibridnih shema (Shin i Hong 2015; Zhang i sur. 2018); ove sheme prelaze iz RANS u LES način rada ovisno o omjeru $\Delta x/z_i$, gdje je z_i visina konvektivnog graničnog sloja (KGS). Primjena ovih parametrizacija na simulaciju bure izvan je okvira ovog rada, ali predstavlja mogući smjer istraživanja. Za parametrizaciju AGS-a u D1–D3 korištena je shema sveučilišta Yonsei (YSU; nelokalna shema zatvaranja prvog reda). YSU je odabrana umjesto MYNN (Poglavlje 5.2.1) zato jer WRF 4.3 (i novije verzije modela) ne dopušta istovremeno korištenje MYNN na mezoskalnoj domeni i LES načina rada na gustoj domeni.



Slika 32: (a) Domene WRF modela. D1 predstavlja najveću (vanjsku), a D4 najmanju (unutarnju) domenu. Koraci mreže su 9, 3, 1 i 0,2 km za, redom, D1, D2, D3 i D4. Broj točaka mreže u pojedinim domenama je 188×175 (D1), 175×151 (D2), 190×172 (D3) i 271×226 (D4). (b) približna udaljenost između susjednih vertikalnih razina do 4 km iznad s.r.m.

Tablica 10: Odabrane parametrizacije, redom, mikrofizičkih procesa, kratko- i dugovalnog zračenja, procesa izmjene količine gibanja, topline i vlage s podlogom, konvekcije i turbulentne izmjene količine gibanja, topline i vlage u AGS-u. Crtica označava da je shema isključena.

| Fizikalni proces | Domene 1–3 | Domena 4 |
|------------------------------|--|----------|
| Mikrofizika | <i>Single-moment 6-class</i> shema (Hong i Lim 2006b) | |
| Kratkovalno zračenje | Dudhia kratkovalna shema (Dudhia 1989) | |
| Dugovalno zračenje | <i>Rapid Radiative Transfer Model</i> (RRTM; Mlawer i sur. 1997) | |
| Površinski procesi | Noah-MP (<i>multiparametrization</i>) shema (Niu i sur. 2011) | |
| Konvekcija (9 i 3 km domene) | Kain-Fritsch shema (Zheng i sur. 2016) | - |
| AGS shema | YSU (Hong i sur. 2006a) | - |

5.3.6 Validacija simulacije i uzrok nastanka pulsacija

Simulacija obuhvaća dvije noći prikazane na Slici 27, s početkom 31. svibnja 2005. u 06 UTC i krajem 2. lipnja u 03 UTC. Prvi korak je provjera točnosti simulacije, tj.

- usrednjene vrijednosti brzine i smjera vjetra,
- perioda, amplitude i rotacijskih značajki pulsacija.

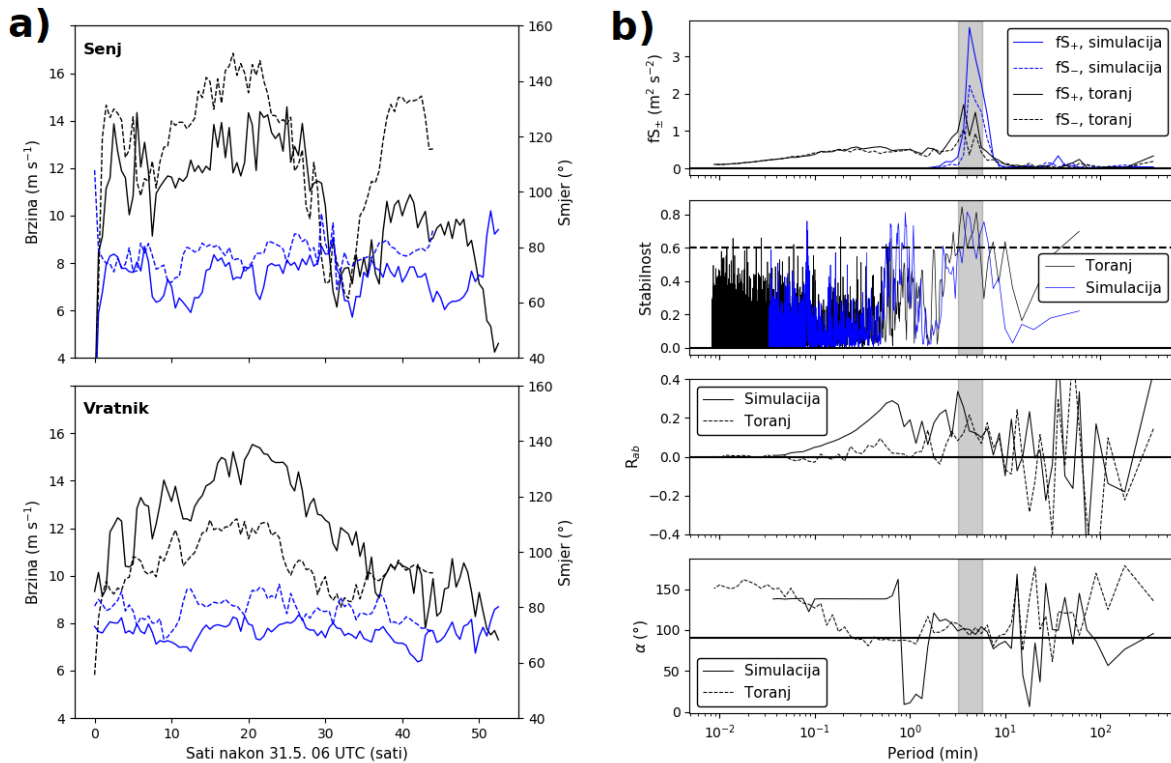
Sekundni vremenski nizovi 10-m brzine i smjera vjetra su izdvojeni iz točaka numeričke mreže domene D4 koje su najbliže postajama u Senju i na Vratniku. Slika 33a prikazuje usporedbu brzine i smjera vjetra. Simulacija brzine i smjera vjetra je zadovoljavajuća, ali postoje određena odstupanja. U Senju je usrednjena vrijednost brzine vjetra blago precijenjena, a na Vratniku je potcijenjena. Na obje postaje je smjer simuliranog vjetra zakrenut 5° – 10° nadesno u odnosu na mjerenja. Odstupanje smjera vjetra je veće u domeni D3. Zbog složenosti okolnog reljefa su uspoređeni i vremenski nizovi iz okolnih točaka numeričke mreže, ali je podudaranje najbolje u najbližim točkama.

Slike 33b i 34 prikazuju izmjerene i simulirane rotacijske značajke pulsacija u Senju. Slika 33 prikazuje rotacijske spektre za 6-h period 31. svibnja 2005. od 18 do 24 UTC. Period pulsacija je dobro simuliran, ali je snaga (amplituda) precijenjena 2–3 puta (1,4–1,7). Važan rezultat predstavlja činjenica da je pozitivna rotacijska komponenta veća od negativne ($R_{ab} > 0$; jednačba 4.6), kao u mjerenjima (Slika 25a). Čak je i orijentacija osi oscilacije pulsacija (α ; jednačba 4.7) dobro izračunata, iako ovaj uvjet nije uvijek ispunjen. To se vidi na Slici 34 koja prikazuje klizne rotacijske spektre simuliranog horizontalnog vjetra 10 m iznad tla u točki numeričke mreže najbliže tornju u Senju. Usporedbom sa Slikom 27 koja prikazuje klizne rotacijske spektre izmjenjenog horizontalnog vjetra za isti vremenski period, simulirani kut osi oscilacije pulsacija je u pravilu manji od izmjenjenog. Kombinirano s nadesno zakrenutim azimutom prizemnog vjetra (Az), kut između Az i α (tj. ϕ) je manji od izmjenjenog; npr. između 31. svibnja, 22 UTC i 1. lipnja, 07 UTC, usrednjena vrijednost ϕ je $\sim 10^{\circ}$ (simulacija) i $\sim 30^{\circ}$ (mjerenja). Također:

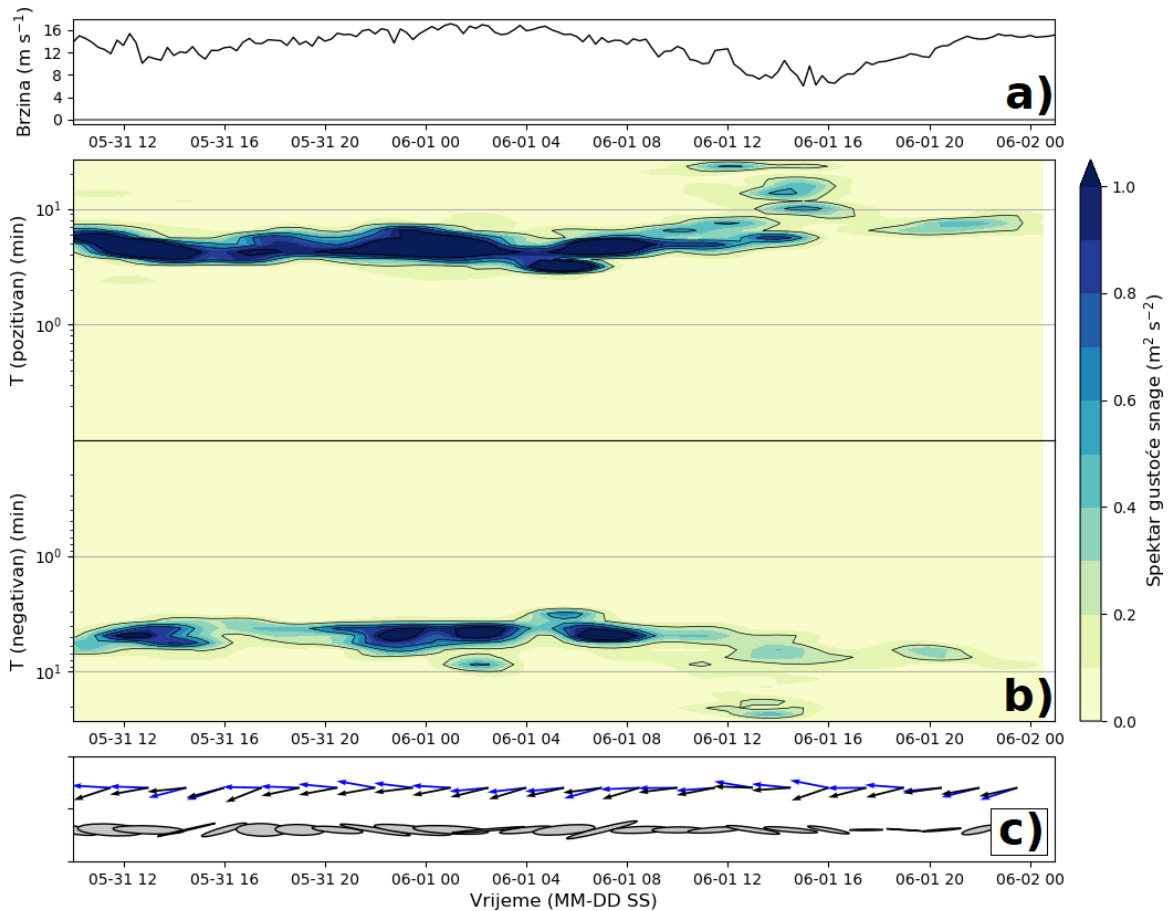
- pulsacije su prisutne tijekom gotovo čitave simulacije (umjesto samo noću),
- pulsacije su monokromatskije od mjerenja (osim pri kraju simulacije), i
- pozitivna rotacijska energija je veća od negativne.

Simulacija je uspješna s obzirom na period i karakterističan oblik gibanja na frekvenciji pulsacija, tj. izduženu elipsu koju vektor horizontalne brzine vjetra opisuje u pozitivnom

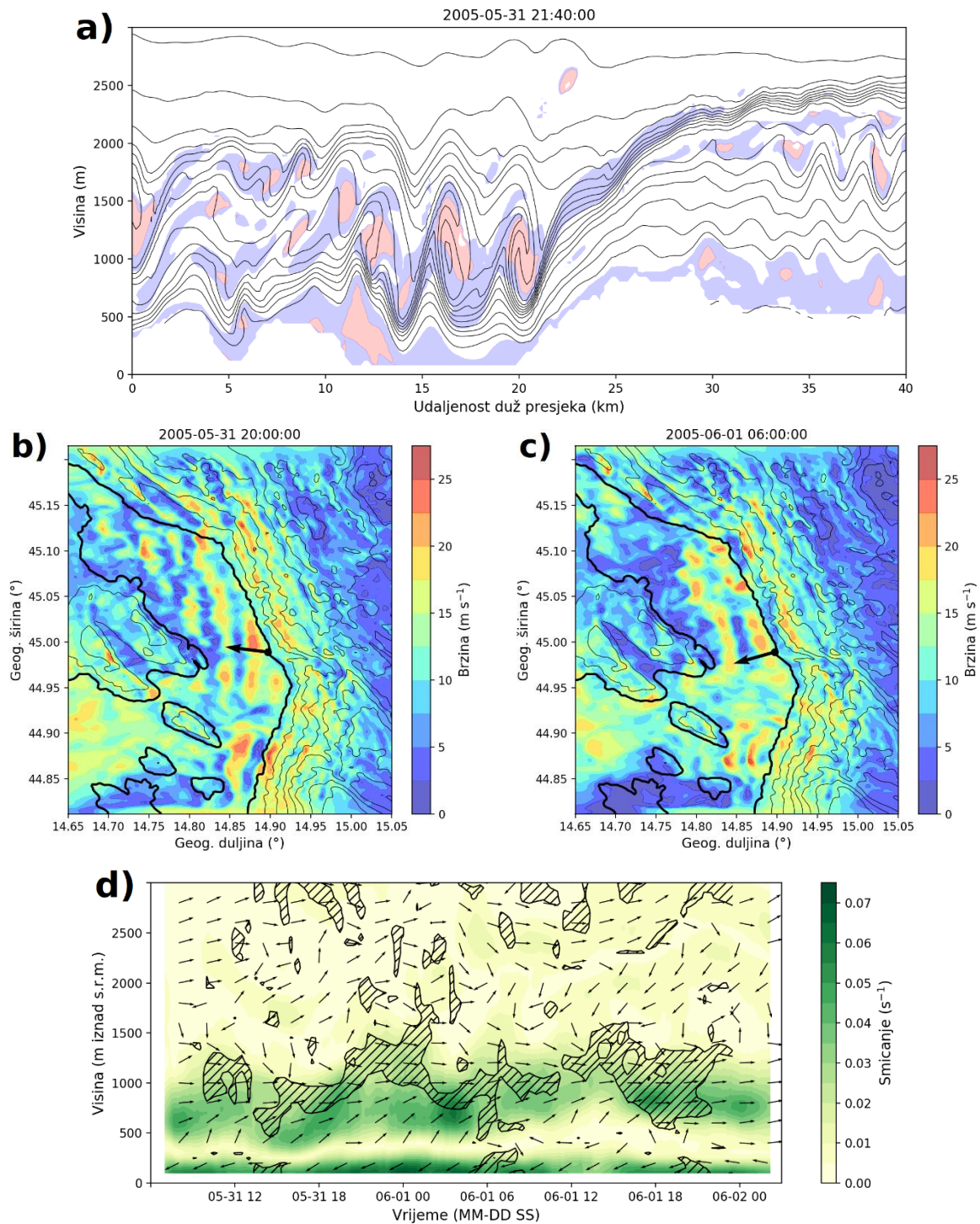
smjeru (Slika 10). Kao u mjerenjima, orijentacija ove elipse nije jednaka smjeru prizemnog vjetra. Simulacije drugih događaja bure su manje uspješne s obzirom na usrednjenu vrijednost brzine i smjera vjetra, ali pokazuju slične rotacijske značajke. Značajno, sve imaju prevladavajući pozitivan smjer rotacije ($R_{ab} > 0$).



Slika 33: (a) Izmjerena (13 m iznad tla u Senju i 9,5 m iznad tla na Vratniku) i simulirana (10 m iznad tla) 30-min klizna usrednjena vrijednost brzine i smjera vjetra (puna i crtkana linija označavaju, redom, mjerenje i simulaciju, a crna i plava boja, redom, brzinu i smjer vjetra). Prikazan je period od 31. svibnja 2005., 06 UTC do 2. lipnja 2005., 03 UTC. (b) izmjerene i simulirane rotacijske značajke u Senju za 6-h period od 18 do 24 UTC, 31. svibnja 2005. Od vrha nadolje to su, redom, frekvencijom otežani rotacijski spektri, stabilnost, R_{ab} i α . Sivom bojom naznačen je raspon perioda na kojem se pulsacije pojavljuju. Spektri simuliranog 10-m vjetra izračunati su na isti način kao u Poglavlju 5.3.1.



Slika 34: (a) 15-min usrednjena vrijednost simulirane 10-m brzine vjetra. (b) simulirani frekvencijom otežani klizni rotacijski spektri pozitivne i negativne rotacijske komponente. Gornja (donja) polovica je pozitivna (negativna) rotacijska komponenta. Os ordinata (tj. period T) je zrcaljena oko središnje linije. (c) dijagram elipsa s α (plave strelice) i 15-min usrednjenom vrijednosti azimuta 10-m vjetra (crne strelice). Prikazani podaci potječu iz točke numeričke mreže najbliže Senju (Slika 5), a odgovaraju vremenskom periodu prikazanom na Slici 27. Klizni spektri su izračunati na prozoru širine 6 h i s korakom od 30 min. Kako bi se elipse nacrtale, spektri su usrednjeni u rasponu perioda od 3 do 11 min. Vrijeme je dato u UTC.

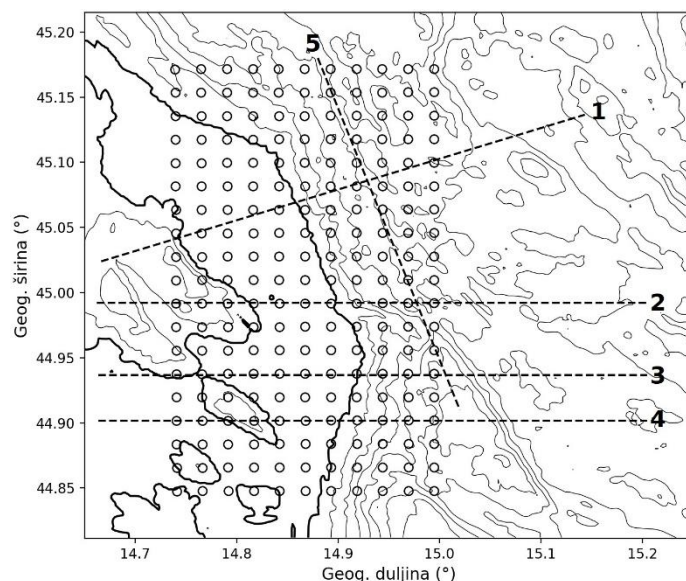


Slika 35: (a) Vertikalni presjek Ri (boja) i θ (konture) duž linije koja prolazi kroz Senj (linija 5 na Slici 36). Područja s $0 < Ri < 0.25$ ($Ri < 0$) su obojana plavom (crvenom) bojom. (b) 10-m brzina vjeta i simulirana os oscilacije pulsacija (α ; crna strelica) 14 h i (c) 24 h nakon početka simulacije. Izohipse terena su prikazane svakih 200 m (obala je prikazana debelom crtom). (d) vremensko-vertikalni presjek simuliranog α i vektora smicanja (\vec{S}). Kosim crtama je osjenčano područje gdje je odstupanje \vec{S} i α manje od 8° .

Slika 35a prikazuje vertikalni presjek strujanja u noćnim satima 31. svibnja 2005. godine. Iznad strujanja (na ~2 km) se nalazi izražena atmosferska inverzija, a smjer vjetra zakreće sa 60° na 270° . Iz polja potencijalne temperature (θ) i Richardsonovog gradijentnog broja (Ri) je očita prisutnost KHN na gornjem rubu spuštajućeg ogranka atmosferske inverzije. Perturbacije zatim rastu i lome se iznad Velebitskog kanala i otoka Krka. Simulirana α u Senju (izračunata u prethodnom poglavlju; Slika 34c) je okomita na vrhove i doline u polju prizemne brzine vjetra (Slike 35b, c). Vremensko-vertikalni presjek vektora smicanja (\vec{S}) iz točke numeričke mreže najbliže Senju (Slika 35d; slično Slici 29 u Poglavlju 5.3.3) pokazuje da je u smičnom sloju između NMS-a i zaustavnog područja α paralelna smjeru \vec{S} . Zaključujem da je uzrok nastanka pulsacija tijekom promatrane simulacije KHN, u skladu s naznakama u Poglavlju 5.3.3.

5.3.7 Prostorna raspodjela rotacijskih značajki pulsacija

Sekundni zapisi simuliranih komponenti 10-m brzine vjetra izdvojeni su iz točaka mreže na Slici 36. Klizni, frekvencijom otežani rotacijski spektri potom su izračunati za svaki od zapisa (metoda RSA; Poglavlje 4.3.3), pri čemu je korišten prozor od 6 h s korakom od 30 min. Energija pulsacija u svim točkama (osim gdje pulsacije izostaju, npr. na navjetrini planine) je sadržana u rasponu perioda od 3 do 11 min pa su klizni spektri u tom rasponu usrednjeni. Ovo omogućava prikaz prostornih raspodjela rotacijskih značajki pulsacija na prikazanoj mreži. Koristit ću izraz „pozitivna“ ili „negativna“ energija pulsacija (E_+ i E_-), pri čemu se misli na frekvencijom otežan spektar (fS_+ i fS_- ; Poglavlje 4.3.3) usrednjen u navedenom rasponu perioda. Ovo se može tumačiti kao usrednjena vrijednost kvadrata amplitude pozitivne i negativne rotacijske komponente pulsacija. Pojedini rezultati (npr. Slika 37b, c) prikazuju trenutna polja rotacijskih značajki. Kako su rotacijske značajke izračunate na temelju kliznog rotacijskog spektra širine 6 h, taj trenutak predstavlja značajku na periodu trajanja 6 h sa sredinom u vrijeme naznačeno na slici.



Slika 36: Mreža točaka (krugovi) iz kojih su izdvojeni sekundni zapisi simuliranih komponenti 10-m brzine vjetra. Svaki zapis proteže se kroz čitavu simulaciju (od 31. svibnja 2005. u 06 UTC do 2. lipnja 2005. u 03 UTC). Crtkana linija 5 predstavlja vremensko-vertikalni presjek brzine i smjera vjetra prikazan na Slici 39. Crtkane linije 1–4 su vertikalni presjeci duž kojih se u Poglavlju 5.3.8 proučava vertikalna komponenta vrtložnosti.

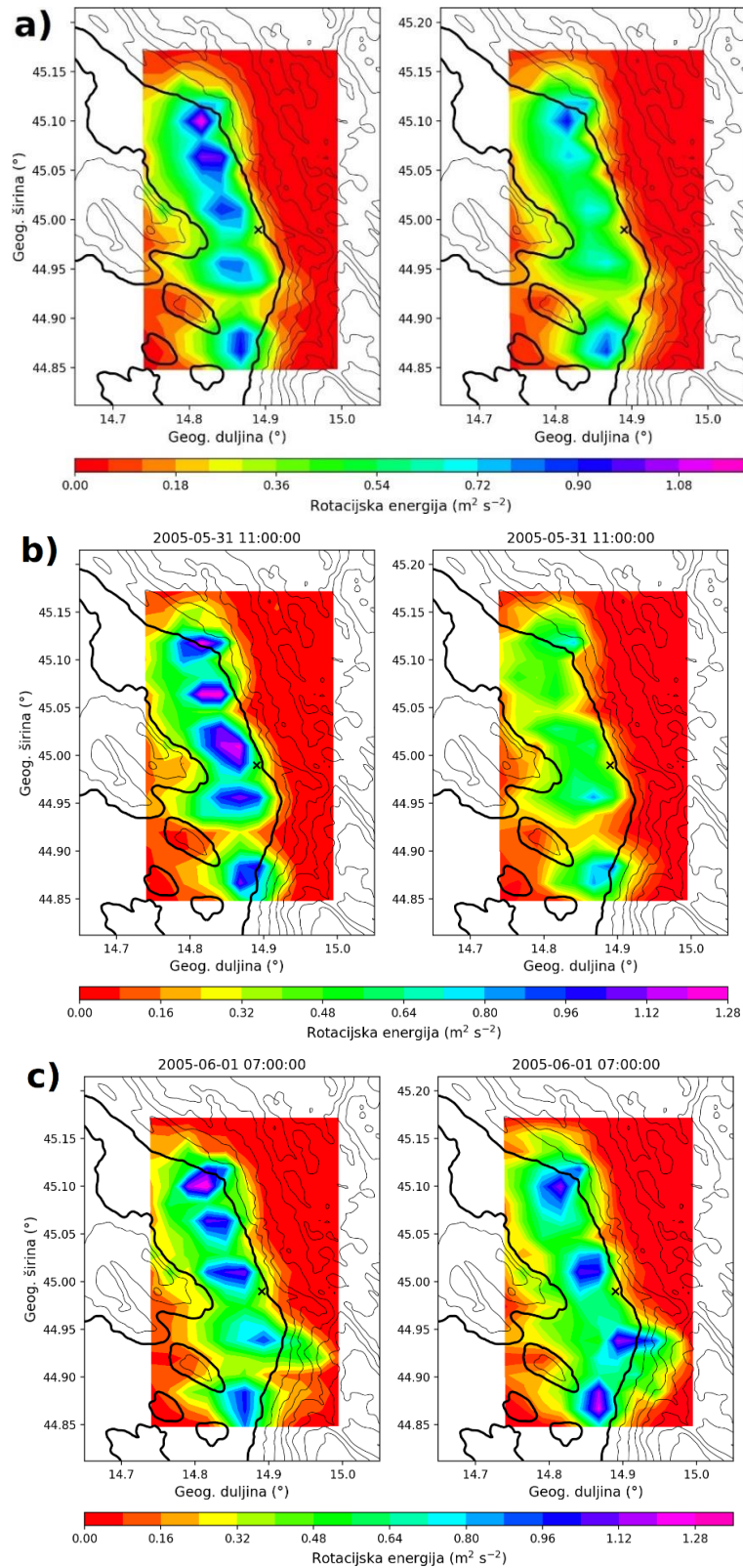
Prostorna raspodjela vremenski usrednjenih E_+ i E_- (Slika 37a; izuzev početnog perioda simulacije) pokazuje da je energija pulsacija sadržana unutar Velebitskog kanala, nakon čega se raspršuje iznad otoka. Stabilnost, tj. koherentnost pulsacija (E ; jednačba 4.7) je najveća u podnožju planine (dostiže i do 0,8) i opada s udaljenošću od obale (nije prikazano). Udaljenost od podnožja planine do točke smanjenja stabilnosti na pozadinsku vrijednost (duljina dekorrelacije) je ~ 10 km, u skladu s Neiman i sur. (1988). Stabilnost i ukupna rotacijska energija pokazuju ovisnost o dobu dana, pri čemu su noću vrijednosti veće.

Prostorna raspodjela vremenski usrednjenih E_+ i E_- također ukazuje na to da je $E_+ > E_-$ na većem dijelu domene, osim na njenom krajnjem jugu i sjeveru (Slika 37a). Prema tome, karakteristično gibanje vjetra na frekvenciji pulsacija je izdužena elipsa koju vektor brzine ocrta u pozitivnom smjeru (Slika 10). Kao u opažanjima, ekscentricitet ove elipse je promjenjiv. Na početku simulacije je $E_+ > E_-$ (Slika 37b), ali kasnije energije dvaju rotacijskih komponenti postaju podjednake (Slika 37c). Ova vremenska promjenjivost se očituje u omjeru poluosi elipse R_{ab} :

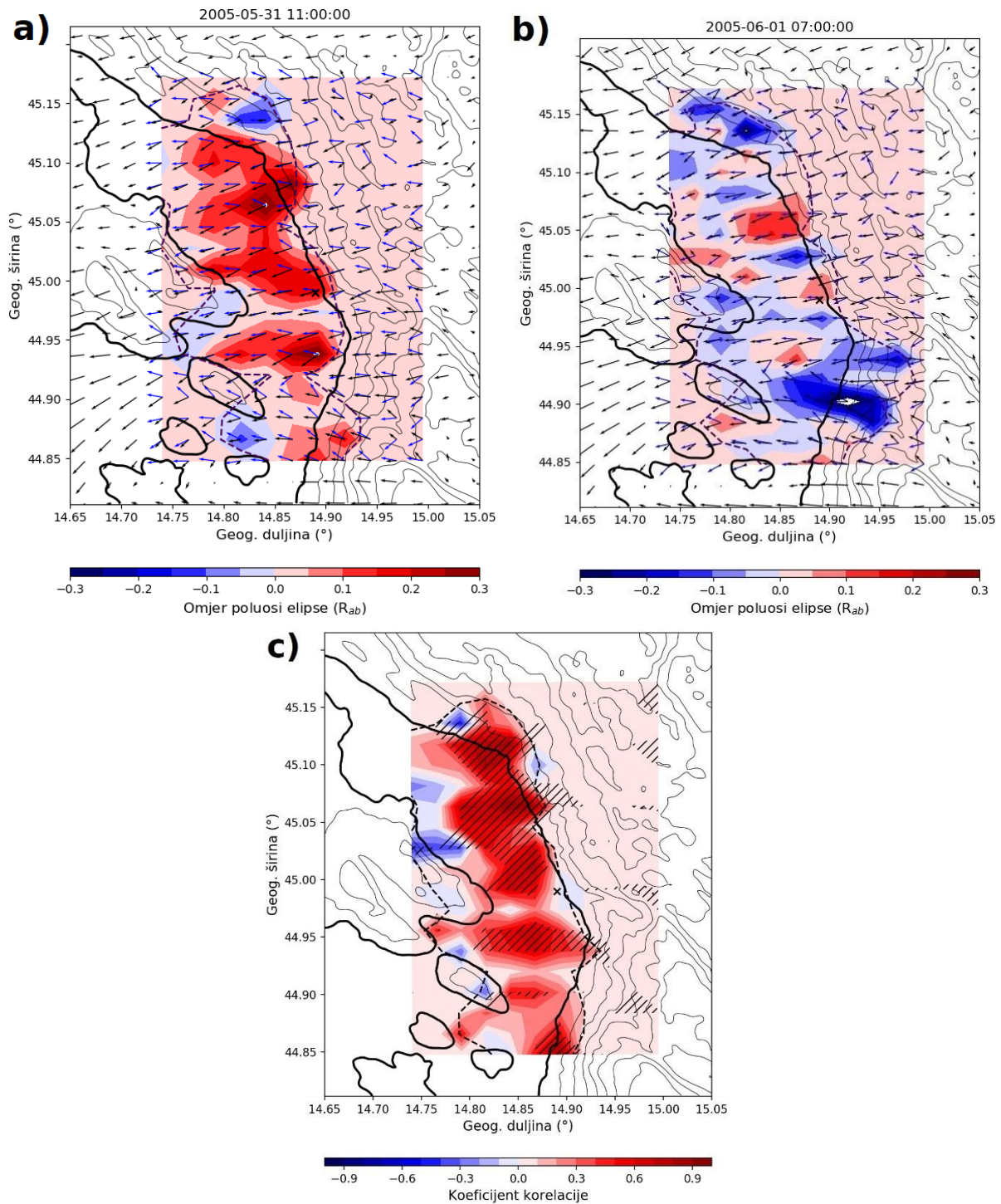
$$R_{ab} = \frac{\sqrt{E_+} - \sqrt{E_-}}{\sqrt{E_+} + \sqrt{E_-}}. \quad (5.12)$$

Jednadžba (5.12) slična je jednadžbi (4.6), ali su spektri gustoće snage rotacijskih komponenti (S_+ i S_- ; Poglavlje 4.3.3) zamijenjeni s E_+ i E_- , tj. njihovim usrednjenim vrijednostima na pojasu perioda od 3 do 11 min. Slika 38a, b prikazuje R_{ab} u istim vremenskim trenucima kao na Slici 37b,c, zajedno s prizemnim vjetrom i orijentacijom osi oscilacije α . Zanimljivo je primijetiti da R_{ab} u srednjem i sjevernom dijelu domene ovisi o kutu ϕ između smjera prizemnog vjetra (Az) i α ; veći ϕ je povezan s većim R_{ab} . Slika 38c pokazuje polje korelacije R_{ab} i ϕ , potvrđujući da njihova ovisnost na Slikama 38a,b nije slučajnost. Kako je α usmjeren duž vektora smicanja (\vec{S} ; Poglavlje 5.3.3), ovo ukazuje na činjenicu da R_{ab} ovisi o zakretanju smjera \vec{S} na vrhu sloja bure. Ako je smicanje vjetra na vrhu sloja bure jednosmjerno (tj. vektor smicanja je paralelan vektoru brzine), onda pulsacije nemaju prevladavajući smjer rotacije ($R_{ab} \approx 0$), dok je smicanje smjera vjetra korelirano s prevladavajućim (u ovom slučaju pozitivnim) smjerom rotacije pulsacija.

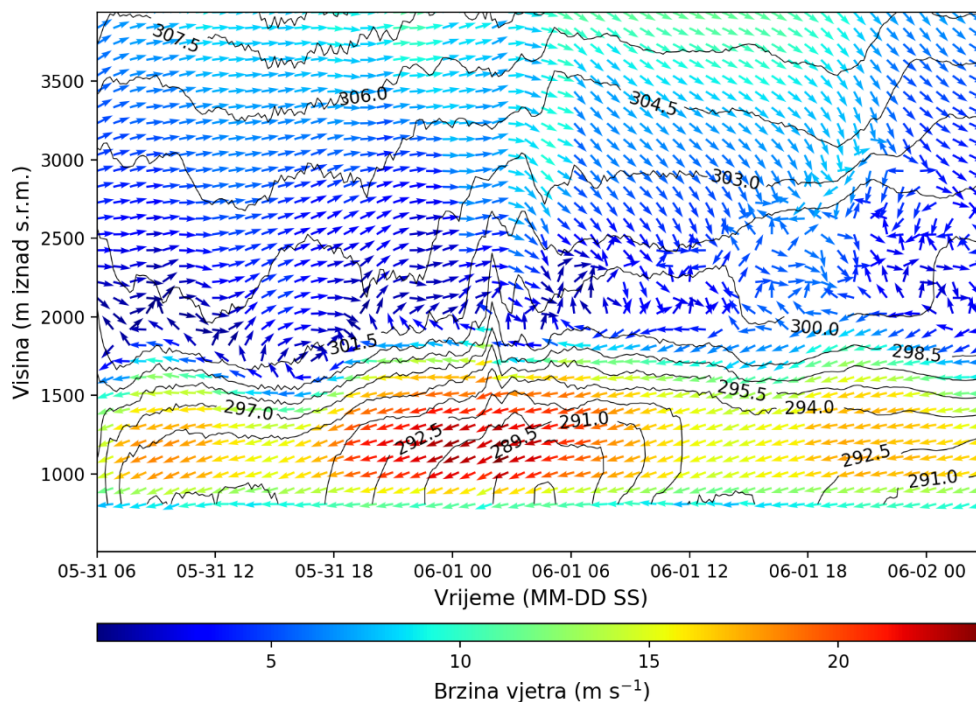
Vremensko-vertikalni profil brzine i smjera vjetra uzvodno od planinskog grebena dan je na Slici 39. Profil se može približno podijeliti na dva dijela, prije i nakon 1. lipnja 2005 u ~ 5 UTC. U prvom dijelu simulacije smjer vjetra iznad kritične razine je zapadni, a ispod istočni (I) do sjeveroistočni (SI). Ispod kritične razine (tj. na gornjem rubu sloja bure) postoji smicanje smjera vjetra od SI prema I. Istovremeno, $R_{ab} > 0$ u zavjetrini planine (Slike 37b i 38a). U drugom dijelu simulacije vjetar iznad kritične razine je SZ, smicanje smjera vjetra na gornjem rubu sloja bure je zamjetno manje, a R_{ab} u zavjetrini je neutralan (Slike 37c i 38b). Prema tome, na prevladavajući smjer rotacije u horizontalnoj ravnini utječe smicanje smjera vjetra na vrhu NMS, a ono pak ovisi o profilu vjetra koji nailazi na planinu. Potonji može ovisiti o sinoptičkom tipu vremena, što ukazuje na moguću razliku u rotacijskim značajkama pulsacija za ciklonalan i anticiklonalan tip bure, unatoč tome što razlika pronađena u Poglavlju 5.3.1 (Slika 26a, b) nije statistički značajna.



Slika 37: Prostorne raspodjele pozitivne (E_+ , lijevi stupac) i negativne (E_- , desni stupac) rotacijske energije pulsacija na 10 m iznad tla (a) usrednjene tijekom cjelokupne simulacije, (b) 5 h i (c) 25 h nakon početka simulacije. Senj je označen križićem.

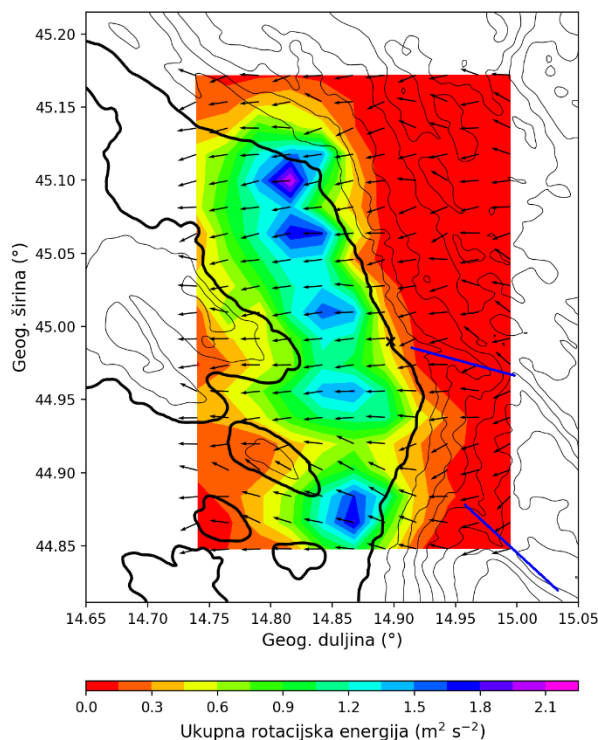


Slika 38: R_{ab} , 10-m vjetar (crne strelice) i smjer α (plave strelice) (a) 5 h i (b) 25 h nakon početka simulacije. (c) korelacija R_{ab} i kuta između α i Az izračunata za cjelokupno trajanje simulacije. Područje sa značajnom korelacijom ($p = 0,01$) je označeno kosim crtama. Crtkana crna linija je granica područja u kojem je ukupna rotacijska energija veća od $0,2 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$. Vrijeme je dano u UTC.



Slika 39: Vremensko-vertikalni presjek potencijalne temperature (konture), smjera i brzine vjetra usrednjenih duž linije 5 na Slici 36. Vrijeme je dano u UTC.

Naposljetku, diskutirat ću utjecaj orijentacije planinskih usjeka na smjer osi oscilacije pulsacija (α ; jednadžba 4.7). Prema hipotezi u Poglavlju 5.3.4, orijentacija usjeka mijenja lokalni vektor smicanja (\vec{S}), time mijenjajući i α (za KH valove, α je jednak smjeru \vec{S} ; Poglavlje 5.3.3). Dva glavna usjeka su Senj–Vratnik i Krasno–Sv. Juraj (Slika 40). U oba slučaja se ne može reći da je α bitno promijenjen nizvodno od ovih usjeka. Umjesto toga, α je na sjevernom i srednjem dijelu približno jednak 90° , tj. os oscilacije položena je u smjeru I–Z. Na južnom dijelu domene ona zakreće prema SZ, približno okomito na orijentaciju planinskog grebena ($\alpha > 90^\circ$). Ovo ne znači da usjeci ne mijenjaju orijentaciju α (tj. vektora smicanja), već samo da profil reljefa na odabranoj domeni nije prikladan za ispitivanje hipoteze. Ovo nije samo zbog neuniformne orijentacije planinskog lanca, već i zbog prisutnosti otoka koji utječu na polje prizemnog strujanja (npr. Prtenjak i sur. 2008). Budući rad stoga bi se trebao usredotočiti na simulacije s idealiziranim terenom. U planinu uniformnog profila umetnuli bi se usjeci pod raznim kutevima u odnosu na orijentaciju planinskog lanca, a dimenzije usjeka bile bi slične gore navedenim usjecima (Grisogono i Enger 2004).



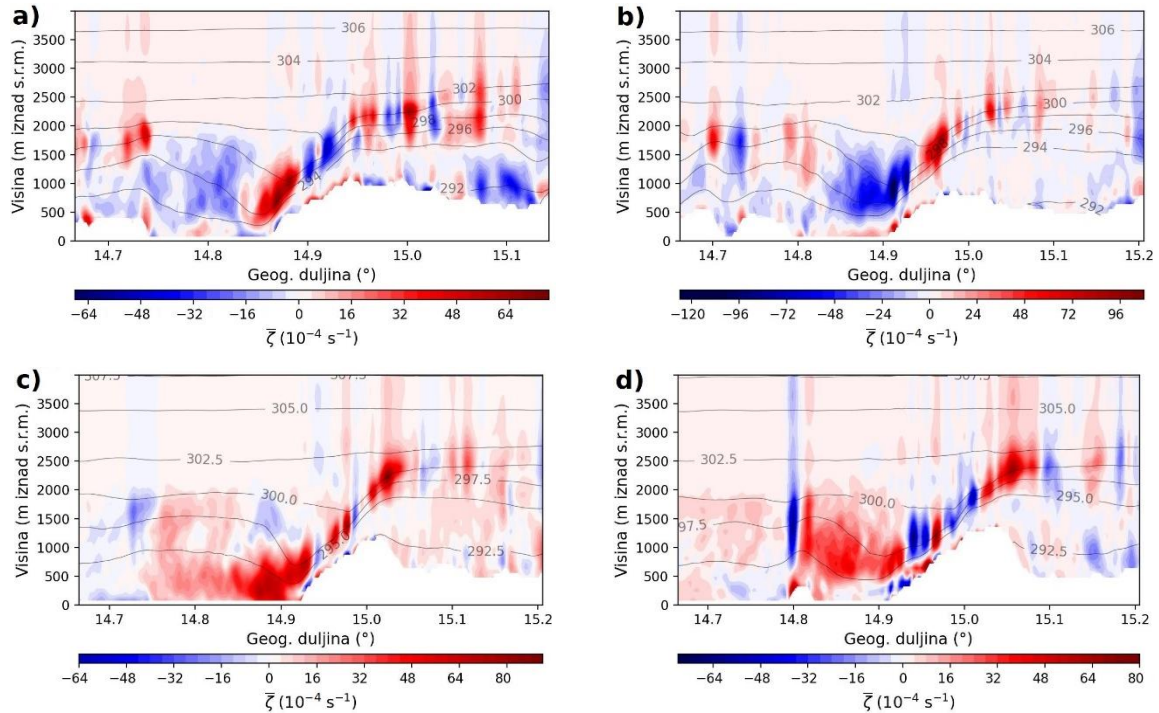
Slika 40: Ukupna rotacijska energija ($E_+ + E_-$) usrednjena tijekom cjelokupne simulacije (od 31.5. do 2.6.2005.) i usrednjena vrijednost orijentacije osi oscilacije α (obje veličine na 10 m iznad tla). Usjeci Senj–Vratnik i Krasno–Sv. Juraj su naznačeni plavim crtama.

5.3.8 Vrtložnost i pulsacije

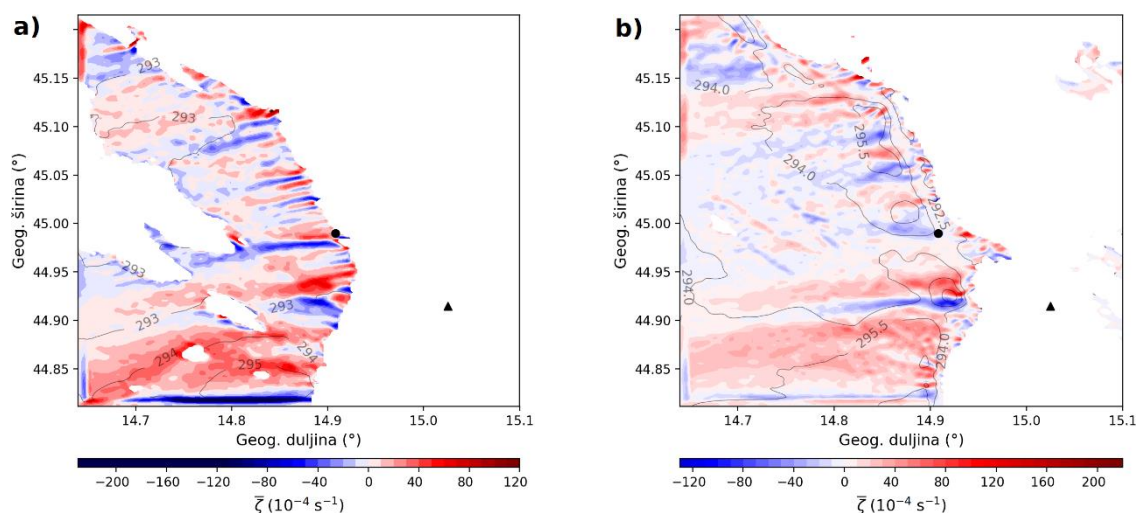
Usporedba polja R_{ab} i vertikalne vrtložnosti (ζ) je provedena s ciljem stjecanja uvida u uzrok prevladavajućeg smjera rotacije pulsacija u horizontalnoj ravnini (Poglavlje 5.3.4). Odabrani su vertikalni i horizontalni presjeci ζ i ostalih bitnih varijabli (komponente vektora brzine vjetera i potencijalne temperature θ). Horizontalni presjeci su izračunati na visinama od 100 m i 500 m, a Slika 36 prikazuje pravce duž kojih su izračunati vertikalni presjeci. Za izračun ζ je korišten programski paket *wrf-python* (Ladwig 2017).

Prvo proučavam raspodjele vremenski usrednjene vertikalne komponente vrtložnosti ($\bar{\zeta}$) duž svih vertikalnih presjeka. Najveće vrijednosti $\bar{\zeta}$ se nalaze na gornjem rubu NMS, iznad i u podnožju planinskih obronaka (500–1500 m iznad s.r.m.), dok su manje vrijednosti $\bar{\zeta}$ prisutne uz podlogu, često suprotnog predznaka od $\bar{\zeta}$ na vrhu NMS (Slika 41a, b). Ova dva područja su razdvojena slojem debljine 100–200 m s manjom amplitudom vrtložnosti. Horizontalni presjeci pokazuju da je $\bar{\zeta}$ organizirana u „repove“ koji se disipiraju s udaljenošću od obale (Slika 42a, b). Repovi se nalaze na rubovima područja povišene θ ; najbolji primjer predstavljaju dipol i repovi $\bar{\zeta}$ u pozadini vrha Jadićeva plan (visine ~1400 m; Slika 42b).

Područja veće θ povezana su s maksimumom rotacijske energije (Slika 43a), vjerojatno zbog lokalne kompresije NMS koja pojačava smicanje i potiče KHN. Raspodjele $\bar{\zeta}$ (Slika 41 i 42) su usporedive s raspodjelama prikazanim u prijašnjim radovima (npr. Grubišić 2004; Belušić i Klaić 2006; Trošić i Trošić 2010).



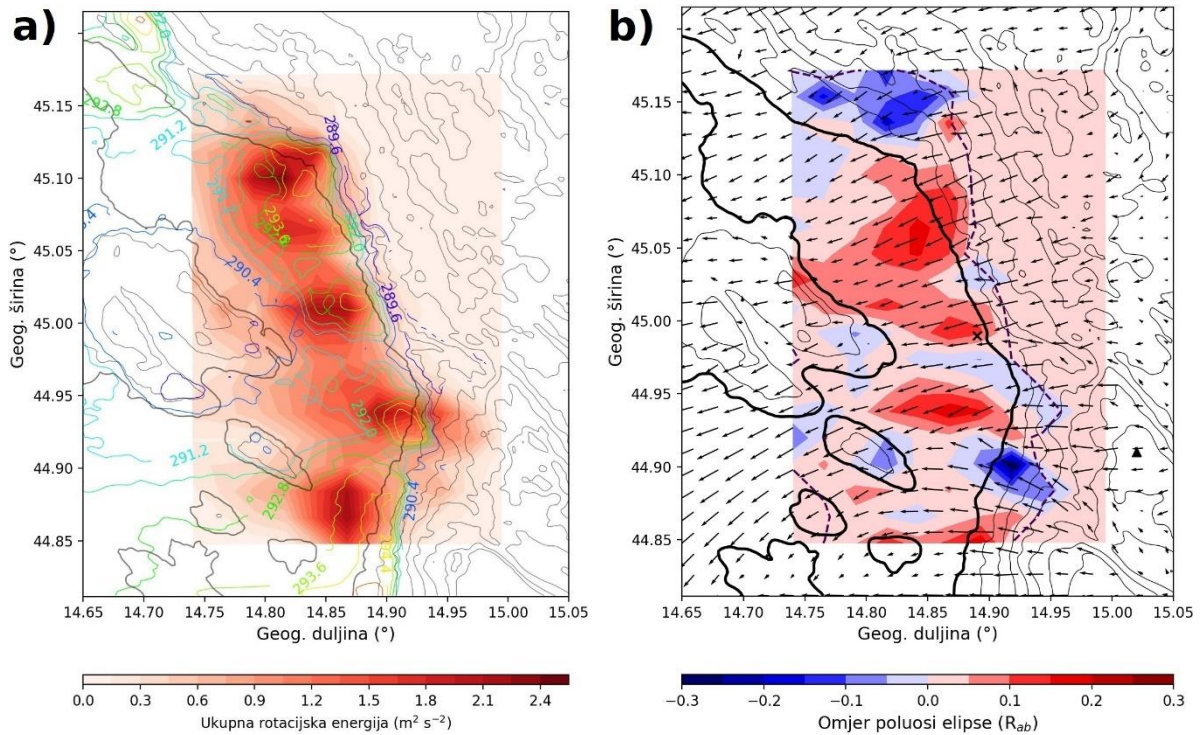
Slika 41: Vertikalni presjeci vremenski usrednjene vertikalne komponente vrtložnosti ($\bar{\zeta}$, boja) i potencijalne temperature (konture) duž pravaca (a) 1, (b) 2, (c) 3 i (d) 4. Pravci su naznačeni na Slici 36, a vremenski usrednjena vrijednost izračunata je za cjelokupno trajanje simulacije.



Slika 42: Horizontalni presjeci vremenski usrednjene vertikalne komponente vrtložnosti ($\bar{\zeta}$, boja) i potencijalne temperature (konture) na visinama od (a) 100 m i (b) 500 m iznad s.r.m. Crni kružić i trokut su, redom, Senj i vrh Jadićeva plan (visine ~1400 m).

Ako se polja omjera poluosi elipse (R_{ab} ; jednadžba 5.12) i $\bar{\zeta}$ usporede za sve vremenske trenutke i sve visine, može se zaključiti da se predznaci R_{ab} i $\bar{\zeta}$ ne podudaraju svugdje. Iznad površine mora na sjevernom i srednjem dijelu domene (područje visoke korelacije R_{ab} i kuta između prizemnog vjetra i osi oscilacije pulsacija na Slici 38c), predznaci R_{ab} i $\bar{\zeta}$ su nepovezani. S druge strane, u neposrednoj blizini reljefa postoje područja gdje se predznaci R_{ab} i $\bar{\zeta}$ često podudaraju. Iznad Senja na visini od 100 m iznad s.r.m. je $\bar{\zeta} > 0$ (Slika 42a), što se slaže s prevladavajućim smjerom rotacije opaženim na tornju (Slika 27). U zavjetrini vrha Jadićeva plan se nalazi kvazistacionaran dipol pozitivnog i negativnog R_{ab} (Slika 43b), a na istom području se također nalazi i dipol $\bar{\zeta}$ (zapadno od crnog trokuta na Slici 42b). Prema tome, u neposrednoj blizini reljefa R_{ab} i $\bar{\zeta}$ jednakog su predznaka, dok su iznad površine mora nepovezani.

Smatram da je razlog ovoj povezanosti kvazistacionaran nagib izentropskih ploha u neposrednoj zavjetrini reljefa. Prema diskusiji u Poglavlju 5.3.4, nagib θ ploha inducira $\bar{\zeta}$ nelinearnim naginganjem lateralne vrtložnosti (Smolarkiewicz i Rotunno 1988; Rotunno i Bryan 2020). Zato jer lateralna vrtložnost ima suprotan predznak pri tlu i na vrhu NMS, ovo objašnjava razliku u predznaku $\bar{\zeta}$ (Slika 41). Nagib θ ploha također određuje prevladavajući predznak vremenski promjenjive komponente vrtložnosti. Prema tome, smatram da je razlog jednakom predznaku R_{ab} i $\bar{\zeta}$ u neposrednoj blizini reljefa lokalni nagib θ ploha, a koji je kvazistacionaran i određen reljefom. Iznad otvorenog mora ovaj nagib je pod manjim utjecajem reljefa pa je potreban drugi uzrok koji bi objasnio prevladavajući smjer rotacije na frekvenciji pulsacija. Smatram da je smicanje smjera vjetra na vrhu NMS taj uzrok. Kako bi opisao način na koji smicanje smjera vjetra utječe na R_{ab} , potrebno je istražiti trenutačna (ne vremenski usrednjena) polja vertikalne komponente vrtložnosti.



Slika 43: (a) Potencijalna temperatura (obojane konture) i ukupna rotacijska energija pulsacija ($E_+ + E_-$) 1. lipnja 2005. u 07 UTC (isti trenutak kao na Slici 38b). Polje θ usrednjeno je na 6-h periodu sa sredinom u naznačeno vrijeme. (b) polja R_{ab} i 10-m vjetra (crne strelice) usrednjena preko prvih 24 h simulacije. Vrh Jadićeva plan označen je crnim trokutom, a Senj križićem.

Slika 44 prikazuje horizontalni (100 m iznad s.r.m.) i vertikalni presjek polja vertikalne vrtložnosti 14 h nakon početka simulacije. Za razliku od Slika 41 i 42, ovo su trenutačna polja, a ne vremenski usrednjene vrijednosti. Ispod vrhova KH valova i uz podlogu mogu se primjetiti područja povećane ζ . Ova područja se mogu primijetiti i na horizontalnom presjeku kao „vrpce“ orijentirane u smjeru sjever–jug. Vrpce su isprekidane, s naizmjeničnom pozitivnom i negativnom ζ . Smatram da je vrtložnost koja nastaje ispod vrhova KH valova odgovorna za prevladavajući smjer rotacije pulsacija. Način na koji nastaje i kako se mijenja uslijed smicanja smjera vjetra može se opisati na sljedeći način (Slika 45):

1. Zbog smicanja na gornjem i donjem rubu sloja bure, postoji kvazistacionarna lateralna komponenta vrtložnosti (η).
2. KH val nastaje iznad planinskog obronka i pojačava η pri tlu i iznad sloja bure. Ako su pulsacije dovoljno jake, povišeni tlak ispod vrha vala može uzrokovati odvajanje strujanja od podloge i nastanak rotora prvog tipa, slično rotorima ispod vrhova stacionarnih planinskih valova (npr. Hertenstein i Kuettner 2005).

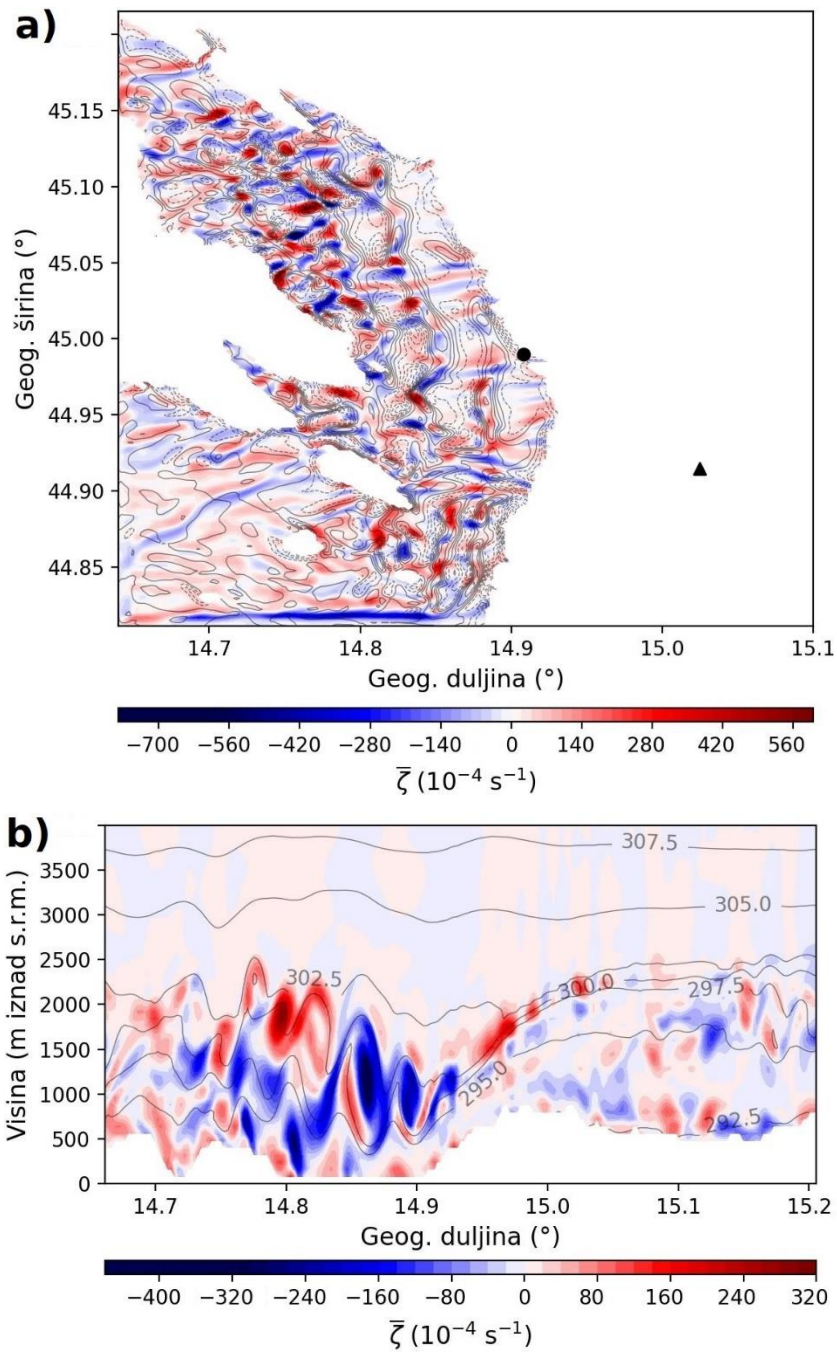
3. KH val se počinje lomiti, ali lom nije lateralno homogen. Ovo stvara lateralni gradijent vertikalne brzine ($\partial w/\partial y$) duž grebena vala (Slika 45b).
4. Vrtložna linija (engl. *vortex line*) koja je prethodno bila horizontalna se zbog $\partial w/\partial y$ počinje naginjati, potičući nastanak vertikalne komponente vrtložnosti. Ova pojava je dana članom III u jednadžbi (3.6).
5. Ako postoji smicanje smjera vjetra, onda postoji prevladavajući smjer naginjanja vrtložne linije (Slika 45b). Na dijelovima gdje je nagib ove linije veći, iznos ζ je veći. Ako je smicanje jednosmjerno, tj. vektor smicanja je paralelan vektoru brzine, onda (statistički govoreći) nema prevladavajućeg smjera naginjanja vrtložne linije

Posljednja točka pojašnjava korelaciju omjera poluosi elipse R_{ab} i kuta između prizemnog vjetra i orijentacije osi oscilacije pulsacija (Slika 39). Ako postoji smicanje smjera vjetra kroz sloj bure, onda $R_{ab} \neq 0$ zato što lomeći KH val preferira proizvodnju pozitivne vrtložnosti (ili negativne, ovisno o smjeru vektora smicanja). Naposljetku, treba naglasiti da ovo tumačenje ovisi o tome da li se vrtložnost potaknuta KH valovima može opisati ravnim, putujućim valovima (Dodatak A3).

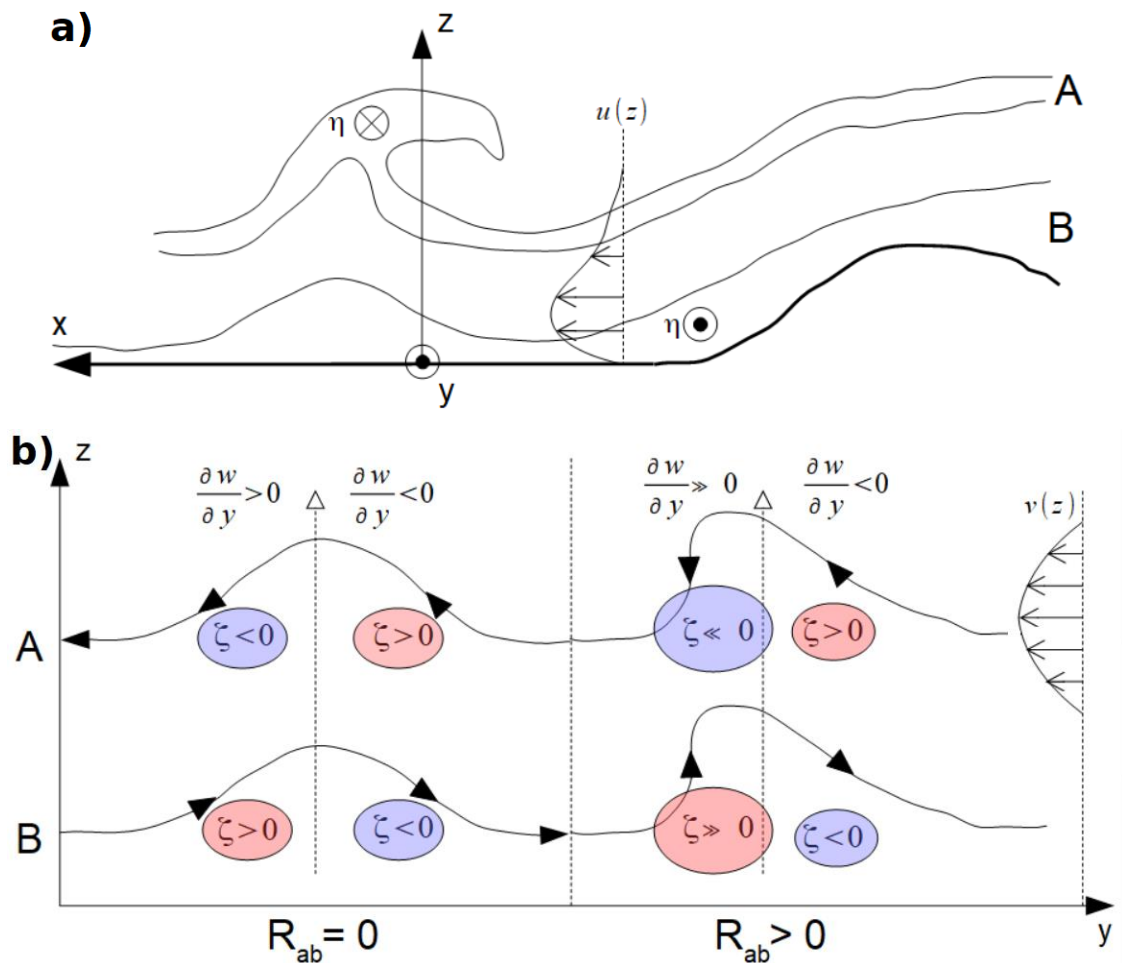
Za provjeru ove hipoteze, specifično

- Da li je ζ koja nastaje uslijed loma KH valova uzrokovana naginjanjem lateralne komponente vrtložnosti, i
- Da li na predznak ζ utječe smicanje smjera vjetra na vrhu NMS,

potrebna je analiza jednadžbe ravnoteže ζ (jednadžba 3.6). Jednadžba se rastavi na konačne razlike te se promatra doprinos svih članova, obrađujući pritom pažnju na doprinose na frekvenciji pulsacija (3 do 11 min). Ravnoteža ζ se zatim uspoređuje s obzirom na izostanak ili prisustvo smicanja smjera vjetra na vrhu NMS.



Slika 44: (a) Horizontalni presjek vertikalne vrložnosti (ζ , boja) i vertikalne brzine (konture; pune crte predstavljaju pozitivnu, a crtkane negativnu vertikalnu brzinu; interval između kontura iznosi 0.8 m s^{-1}) na visini od 100 m iznad s.r.m. (b) vertikalni presjek ζ (boja) i potencijalne temperature (konture) duž pravca 2 (Slika 36). Prikazan je trenutak 31. svibnja 2005. u 20 UTC (14 h nakon početka simulacije).



Slika 45: Shematski prikaz nastanka vertikalne komponente vrtložnosti (ζ) naginjanjem lateralne komponente vrtložnosti (η) lomećeg KH vala u prisustvu smicanja smjera vjetera na vrhu NMS. (a) područja povećane η na vrhu (A) i pri dnu NMS (B). (b) deformacija vrtložne linije lateralno heterogenim poljem vertikalne brzine (w) u izostanku (lijevo) i prisustvu (desno) smicanja smjera vjetera na vrhu NMS. U desnom slučaju pri podlozi postoji prevladavajući smjer rotacije ($R_{ab} > 0$).

5.3.9 Osvrt i daljnji rad

Analizirane su horizontalne rotacijske značajke pulsacija bure. Korišten je skup događaja bure prikupljen anemometrom u Senju u razdoblju od devet mjeseci, iz kojeg je izdvojeno oko 240 sati zapisa obilježenog pulsacijama. Nekoliko je bitnih novih saznanja:

- Karakteristična struktura pulsacija u horizontalnoj ravnini je izdužena elipsa. Vektor brzine vjetera na frekvenciji pulsacija ocrta ju gotovo uvijek u pozitivnom smjeru, tj. u smjeru obrnutom od kazaljke na satu (Slika 25a).

- Orijehtacija velike poluosi elipse duž koje česti zraka osciliraju (α) nije nužno paralelna smjeru vjetra u niskoj mlaznoj struji (NMS). Usporedba s podacima ERA5 reanalize pokazuje da je α orijentirana duž vektora smicanja u NMS (Slike 29 i 30).

Stabilnost (tj. koherentnost) pulsacija ovisi o kutu između azimuta prizemnog vjetra (Az) i α , pri čemu je manji kut koreliran s koherentnijim pulsacijama. Navedena svojstva ne pokazuju značajnu ovisnost o brzini vjetra ili sinoptičkom tipu bure. Kolinearnost α i vektora smicanja, relativno visoka stabilnost i kvazilinearan karakter oscilacija ukazuju da pulsacije u većini slučajeva nastaju zbog KHN ili PZV (Poglavlje 5.3.3). Uzrok pozitivne rotacije pulsacija nije objašnjen. Također, iako je pokazano da je α kontroliran lokalnim smjerom smicanja, nije objašnjeno što utječe na smjer smicanja u neposrednoj zavjetrini planinskog grebena.

S ciljem proučavanja prostorne raspodjele rotacijskih značajki pulsacija i odgovaranja na dva gore navedena pitanja, provedena je numerička simulacija događaja bure iz lipnja 2005. godine. Simulacija je uspješna s obzirom na period, prevladavajući smjer rotacije pulsacija (tj. polaritet) te kut između smjera prizemnog vjetra i osi oscilacije pulsacija, ali ne i vrijeme početka i završetka pulsacija (Slike 34 i 35). Amplituda pulsacija osjetljiva je na vertikalni i horizontalni korak numeričke mreže, ali polaritet i ostale značajke nisu. Uzrok pulsacija u simulaciji je KHN (Slika 36a). Ohrabren podudaranjem simulacije i mjerenja, proučio sam prostornu raspodjelu rotacijskih značajki pulsacija u Velebitskom kanalu. U prosjeku, pozitivna rotacijska komponenta nadjačava negativnu na gotovo čitavom području kanala. Prema tome, kao iznad Senja, karakter gibanja na frekvenciji pulsacija izdužena je elipsa koju vektor brzine opisuje u pozitivnom smjeru (Slika 38a). Ekscentricitet ove elipse, tj. relativna jakost rotacijskih komponenti, promjenjiv je u vremenu (Slika 38b, c). Iznad Senja i u blizini planinskih vrhova, prevladavajući smjer rotacije koreliran je s poljem vremenski usrednjene vertikalne komponente vrtložnosti (Slika 44), a iznad otvorenog mora sa smicanjem smjera vjetra na vrhu NMS (Slika 39). Predlažem da je horizontalna rotacija na frekvenciji pulsacija uzrokovana naginjanjem vrtložnih linija lateralne komponente vrtložnosti unutar ili ispod vrhova KH valova. U prisustvu smicanja smjera vjetra, ovo naginjanje može imati prevladavajući smjer (Slika 45).

Budući rad trebao bi se usredotočiti na sljedeće:

1. Analizu horizontalnih rotacijskih značajki pulsacija na drugim postajama duž Jadranske obale. Kako bi se proučila veza između smicanja i prevladavajućeg smjera rotacije i

provjerili rezultati simulacije u Poglavlju 5.3.7, takva postaja bi se idealno nalazila iznad otvorenog mora ili najmanje nekoliko kilometara udaljena od priobalnih planina. Jedini toranj s visokofrekventnim mjerenjima brzine vjetra koji barem djelomično ispunjava gore navedene kriterije nalazi se na Maslenici (Večenaj i sur. 2015).

2. Analizu jednadžbe ravnoteže vertikalne komponente vrtložnosti (ζ ; jednadžba 3.6) s i bez smicanja smjera vjetra na vrhu NMS.
3. Simulacije koristeći idealizirani teren i profile nailazećeg strujanja. Ovo bi omogućilo proučavanje utjecaja orijentacije usjeka u planinskom lancu na orijentaciju osi oscilacije pulsacija (α) ili utjecaj smicanja smjera vjetra u profilu nailazećeg strujanja na rotacijske značajke pulsacija (s naglaskom na R_{ab} ; Slika 39).

6. ZAKLJUČAK

6.1 Značajke turbulencije u Senju i na Vratniku

Statističke značajke turbulencije (TKE, viskozna disipacija TKE, tokovi količine gibanja) na dvjema bliskim mjernim postajama, Senju i Vratniku, su uspoređene za dugotrajan skup podataka (ukupno oko 6 mjeseci). Zbog razlike u visini postavljanja mjernog uređaja (13 m u Senju i 9,5 m na Vratniku) i površinskog pokrova, rezultati su uspoređeni s obzirom na teoriju sličnosti neutralnog prizemnog sloja (NPS). Kanonski NPS zbog brdovitosti terena nije očekivan, ali zapažena odstupanja su korisna za razumijevanje ostvarenih rezultata.

Iz skupa podataka su izdvojeni vremenski periodi s istovremenim događajima bure na objema postajama, nakon čega su podaci obrađeni i prilagođeni daljnjoj analizi. S ciljem proučavanja utjecaja uvrštavanja submezoskalnih gibanja (tj. pulsacija) u definiciju turbulencije, odabrane su dvije vremenske skale (τ) za razdvajanje turbulencije od (sub)mezoskalnih gibanja, i to konstantan (15 min) i promjenjivi τ . U oba slučaja je za određivanje τ korištena metoda spektralnog procjepa. Za izračun ε je korištena inercijsko-disipacijska metoda, što je moguće zbog prisutnosti nagiba od $-5/3$ u spektrima komponenti brzine vjetra, iako stroga izotropnost turbulencije na frekvenciji uzorkovanja od 4 Hz nije opažena.

Analiza statističkih značajki turbulencije je potvrdila određena saznanja prethodnih istraživanja provedenih na jednom ili manjem broju događaja bure. TKE i tokovi količine gibanja su u Senju 1,5–2 puta veći nego na Vratniku (ovisno o odabiru τ ; izdvajanje pulsacija u pravilu ih smanjuje za $\sim 20\%$). Raspodjele ε su gotovo identične, u suprotnosti s prijašnjim radovima gdje je ε u Senju, slično kao i TKE, dvostruko veća nego na Vratniku. Jedan od razloga je vremenska promjenjivost omjera $\varepsilon_{\text{Senj}}$ i $\varepsilon_{\text{Vratnik}}$ (tj. njihov omjer nije jednak za sve događaje bure), što naglašava potrebu korištenja većeg skupa događaja bure.

Dijagrami raspršenja usrednjene vrijednosti longitudinalne brzine vjetra, TKE i ε ukazuju na to da su podaci na Vratniku bliži jednostavnoj smično-disipacijskoj ravnoteži NPS-a od podataka u Senju. Veće odstupanje u Senju se djelomično može objasniti analizom bezdimenzijske disipacije, spektara snage i varijanci komponenti brzine vjetra, a koji ukazuju na odstupanja od NPS-a karakteristična za sloj hrapavosti (SH). Ovo se najbolje vidi u pomaku vršnih frekvencija bezdimenzijskih spektara. U Senju je pomak prisutan u svim komponentama (horizontalnim i vertikalnoj), a na Vratniku samo u vertikalnoj komponenti brzine vjetra.

Mjerenja u Senju su, dakle, pod većim utjecajem bliskih elemenata hrapavosti nego na Vratniku (anemometar u Senju se nalazi na visini $z/z_H \approx 1,3$, a na Vratniku $z/z_H \approx 2$, pri čemu je z_H karakteristična visina elemenata hrapavosti). Jedan od utjecaja SH je smanjenje ε uslijed uvođenja dodatnih ponora TKE u jednadžbu ravnoteže, što doprinosi neočekivanoj jednakosti ε na dvjema postajama. Razlika u vrijednostima TKE objašnjena je istovremenim djelovanjem submezoskalnih doprinosa (tj. pulsacija) i veće aerodinamičke duljine hrapavosti tla (z_0) u Senju. Statističke značajke u Senju također ukazuju na ovisnost o azimutu prizemnog vjetra, vjerojatno uzrokovanoj anizotropijom površinskog pokrova uzvodno od tornja.

Integralne duljinske skale turbulencije su u Senju 2–3 puta veće nego na Vratniku, ovisno o odabiru τ . Intenziteti turbulencije su unutar raspona vrijednosti preporučenih u međunarodnim standardima, ali odstupaju od vrijednosti izmjerenih na srednjem Jadranu.

6.2 Izračun TKE numeričkim modelom

U ovoj cjelini je proučena sposobnost numeričkog modela (WRF-ARW) da simulira vertikalne profile TKE te usrednjenih vrijednosti brzine i smjera vjetra iznad brdovitog terena u zaleđu Rijeke. Motivaciju ove cjeline predstavlja nedostatak mjerenja iznad 60 m nad tlom s kojima se profili simulirane TKE mogu usporediti. Za validaciju simulacije je korišten skup podataka prikupljen na 100 m visokom tornju s anemometrima na 25 m, 50 m, 75 m, 98 m i 100 m iznad tla. Ovo predstavlja dosad najviša neprekidna toranjska, i općenito in situ mjerenja brzine vjetra i statističkih značajki turbulencije bure u prizemnom sloju atmosfere. Skup podataka uključuje 10-min usrednjene vrijednosti i standardne devijacije brzine i smjera vjetra, omogućavajući procjenu horizontalne komponente TKE. Iz skupa podataka je izdvojen vremenski period iz siječnja i veljače 2012. godine tijekom kojeg su mjerni uređaji na tornju zabilježili iznimno dugačak niz uzastopnih jakih do orkanskih bura. Ovo omogućava usporedbu sa rezultatima simulacije kroz čitav proces početka, razvoja i kraja bure. Odabran je model WRF-ARW s tri ugniježdene domene. Zbog ovisnosti strujanja bure o reljefu, unutarnja domena ima korak mreže od 0,3 km, a visina terena je reprezentirana ASTER modelom Zemljine površine.

Azimut smjera vjetra na svim visinama je $\sim 60^\circ$ i točno je određen numeričkim modelom. S obzirom na podudaranje mjerenja i simulacije, mogu se izdvojiti tri perioda puhanja bure: plitka bura (PB) koja obuhvaća $\sim 60\%$ događaja, duboka bura (DB) i period početka/kraja događaja bure (Slika 20). Podudaranje brzine vjetra najbolje je tijekom PB, zatim tijekom DB,

a najlošije je u periodu početka i kraja bure. Općenito, podudaranje je bolje ako je usrednjena brzina vjetra veća od granične vrijednosti (20 m s^{-1}). Točnost modela je najmanja blizu tla na visini od 25 m jer je u simulaciji na toj visini prisutna niska mlazna struja koje u mjerenjima nema.

Horizontalna komponenta TKE na tornju (\hat{e}_H) je određena na temelju 10-min usrednjene vrijednosti i standardnih devijacija brzine i smjera vjetra. Kao za usrednjenu vrijednost brzine vjetra, odstupanje simulirane vrijednosti TKE (e_s) i \hat{e}_H ovisi o periodu puhanja bure, s većim odstupanjem tijekom duboke bure te pri početku i kraju događaja. RMSE između e_s i \hat{e}_H iznosi ~20% tijekom PB, ~25–30% tijekom DB te do 100% pri početku i kraju događaja. Čak i s ovim odstupanjem, krivulje e_s i \hat{e}_H su općenito slične. Opaženo opadanje TKE s visinom iznad tla također je dobro simulirano.

6.3 Rotacijske značajke pulsacija bure

Proučene su rotacijske značajke pulsacija bure u horizontalnoj ravnini koristeći rotacijsku spektralnu analizu (RSA). RSA rastavlja gibanje na pozitivno i negativno rotirajuću komponentu te pruža uvid u karakter gibanja u horizontalnoj ravnini na određenoj frekvenciji. Tri su uzroka nastanka pulsacija do sada predložena: Kelvin-Helmholtzova nestabilnost (KHN), horizontalno propagirajući zavjetrinski valovi (PZV) i naginjanje osnovne vrtložnosti kvazistacionarnog planinskog vala. Analizirajući oko 240 h izdvojenih iz istog skupa podataka kao u prvoj cjelini (toranj u Senju), pokazujem da karakteristično gibanje česti zraka na frekvenciji pulsacija odgovara izduženoj elipsi orijentiranoj duž vektora smicanja u niskoj mlaznoj struji (NMS). Ove značajke odgovaraju KHN ili PZV kao uzrocima nastanka pulsacija. Rotacijske značajke nisu statistički značajno povezane sa sinoptičkim tipom bure. Pozitivna rotacijska komponenta pulsacija je gotovo uvijek veća od negativne, što znači da vektor horizontalne brzine vjetra na frekvenciji pulsacija ocrtava navedenu elipsu u pozitivnom smjeru. Idealizirani KH i PZ valovi ne posjeduju prevladavajući smjer rotacije u horizontalnoj ravnini, pa izvor rotacije na ovako kratkim periodima predstavlja zanimljivo pitanje.

Kako mjerenja u jednoj točki na to pitanje ne mogu dati odgovor, provedena je numerička simulacija ljetnog događaja bure. Osim usrednjene vrijednosti brzine i smjera vjetra, simulacija je uspješna s obzirom na period i prevladavajući pozitivni smjer rotacije pulsacija. Amplituda pulsacija je osjetljiva na horizontalni i vertikalni korak mreže, ali polaritet nije, ukazujući da

potonji nije posljedica odabira koraka mreže. Uzrok pulsacija u simulaciji je KHN. Ohrabren podudaranjem simulacije i mjerenja u Senju, proučio sam prostorne i vremenske raspodjele rotacijskih značajki. Prostorne raspodjele pokazuju da pozitivna rotacijska komponenta nadjačava negativnu na gotovo čitavom području Velebitskog kanala, iako je njihov odnos vremenski promjenjiv. Iznad Senja i u neposrednoj blizini planinskih vrhova, prevladavajući smjer rotacije pulsacija je koreliran s poljem vremenski usrednjene vertikalne komponente vrtložnosti, a iznad otvorenog mora sa smicanjem smjera vjetera na vrhu NMS. Predlažem da je horizontalna rotacija na frekvenciji pulsacija uzrokovana naginjanjem vrtložnih linija lateralne komponente vrtložnosti unutar ili ispod vrhova KH valova. U prisustvu smicanja smjera vjetera naginjanje može biti izmijenjeno na način da pri tlu postoji prevladavajući smjer rotacije. Detaljna analiza vertikalne komponente vrtložnosti koristeći simulacije s realističnim i idealiziranim reljefom je potrebna za proučavanje ove hipoteze. Zbog heterogenosti terena, simulacija nije pomogla odrediti utjecaj orijentacije planinskih usjeka na zavjetrinsku raspodjelu vektora smicanja (a time i osi oscilacije pulsacija). Potonje bi se također moglo proučiti koristeći idealizirane simulacije.

6.4 Originalni znanstveni doprinosi

Originalni doprinosi obuhvaćaju sljedeća saznanja:

- Statističke značajke turbulencije bure na dvjema postajama, Senju i Vratniku, su uspoređene za opsežan skup događaja bure.
- Raspodjele viskozne disipacije TKE (ε) na navedenim postajama su gotovo identične, u suprotnosti s prethodnim istraživanjima koja su na temelju jednog događaja zaključili da je $\varepsilon_{\text{Senj}} \approx 2\varepsilon_{\text{Vratnik}}$. Ovo ističe vrijednost korištenja većeg skupa događaja bure.
- Vrijednosti intenziteta turbulencije u Senju i na Vratniku su u rasponu vrijednosti preporučenih u međunarodnim standardima.
- Numerička simulacija trodnevnog događaja bure uspoređena je s mjerenjima na tornju visine 100 m u zaleđu Rijeke, dosad najvišeg tornja korištenog za proučavanje bure.
- Rotacijska spektralna analiza korištena je za proučavanje horizontalnih rotacijskih značajki pulsacija bure. Karakteristična struktura pulsacija je izdužena elipsa orijentirana duž vektora smicanja na vrhu NMS, ukazujući da su prevladavajući uzroci nastanka pulsacija u Senju KHN ili horizontalno propagirajući zavjetrinski valovi (PZV).

- Pulsacije imaju prevladavajući (pozitivan) smjer rotacije u horizontalnoj ravnini; ovo povlači pitanje uzroka rotacije jer idealizirani KHN i PZV nemaju rotaciju u horizontalnoj ravnini.
- Numeričkom simulacijom koraka mreže od 0,2 km su uspješno modelirane rotacijske značajke pulsacija u Senju s posebnim naglaskom na točan smjer rotacije.
- Proučavanjem prostornih raspodjela rotacijskih značajki na području Velebitskog kanala, pronađena je snažna korelacija prevladavajućeg smjera rotacije i smicanja smjera vjetra na vrhu NMS. Predlažem da je izvor rotacije u horizontalnoj ravnini naginjanje lateralne komponente vrtložnosti lomećeg KH vala, a koje je modificirano smicanjem smjera vjetra.

PRILOZI

A1 Procjena TKE iz standardnih devijacija brzine i smjera vjetra

Skup podataka s tornja u zaleđu Rijeke (Poglavlje 4.1.1) ne uključuje izmjerene 1 Hz podatke, već samo njihove 10-min statističke značajke (Tablica 1). Za procjenu TKE je dostupna usrednjena vrijednost (μ_U) i standardna devijacija (σ_U) horizontalne brzine vjetra i standardna devijacija smjera vjetra (σ_θ). Horizontalna TKE (e_H) je izračunata izrazom

$$2e_H = \sigma_u^2 + \sigma_v^2 \approx \sigma_U^2 + \mu_U^2 \sigma_\theta^2 \equiv 2\hat{e}_H. \quad (A1)$$

Jednadžba (A1) dobije se razvojem $u = U\cos\theta$ i $v = U\sin\theta$ u red, kvadriranjem te usrednjavanjem (ekvivalentno propagaciji pogreške). Za male vrijednosti σ_U/μ_U i σ_θ , (A1) je točna procjena e_H . Relativna pogreška

$$R = \frac{e_H - \hat{e}_H}{\hat{e}_H}, \quad (A2)$$

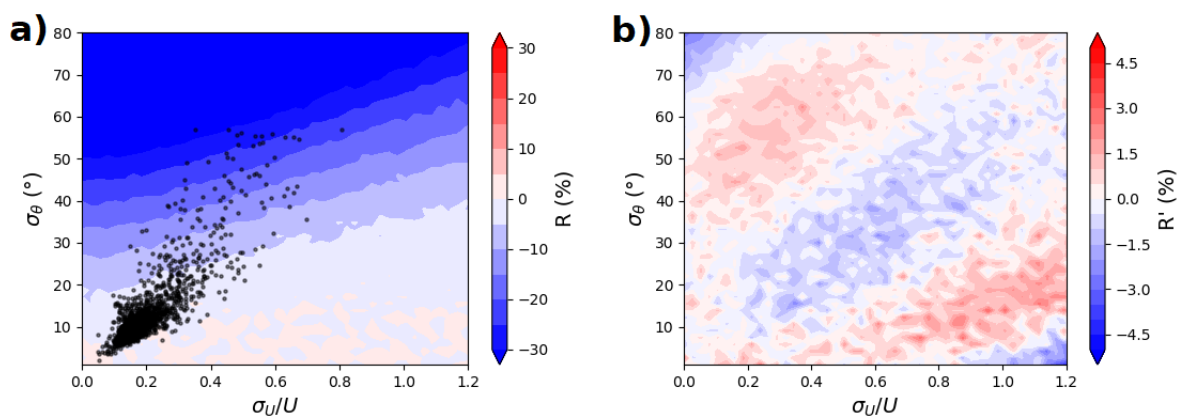
može se procijeniti na sljedeći način:

1. izdvoje se parovi ($\sigma_U/\mu_U, \sigma_\theta$) te se za svaki par načini velik skup brzina i smjerova vjetra (U, θ) pod pretpostavkom $U \sim N(\mu_U, \sigma_U)$ te $\theta \sim N(0, \sigma_\theta)$, gdje je $N(0, 1)$ standardna normalna raspodjela,
2. izračunaju se horizontalne komponente brzine vjetra za svaki član uzorka, i
3. izračunaju se e_H, \hat{e}_H i njihova relativna pogreška R .

Slika A1 prikazuje pogrešku, tj. R , kao funkciju σ_U/μ_U i σ_θ . Očekivano, što je σ_θ veći, to je relativna pogreška veća. Ako je $\sigma_\theta = 0$, $R = 0$ jer je horizontalni vjetar jednodimenzionalan. Većina podataka s tornja je u području $R < 5\%$, ali postoje slučajevi gdje je odstupanje veće. Procjena (A1) može se poboljšati na način da se (A2) modelira polinomom 3. reda $\hat{R} = P(\sigma_U/\mu_U, \sigma_\theta)$, pa se iskoristi za ispravak, tj.

$$\hat{e}'_H = \hat{e}_H(1 + \hat{R}). \quad (A3)$$

Za modeliranje polinoma korišten je programski paket *scikit-learn* (Pedregosa i sur. 2011). Na ovaj način pogreška procjene $R' = (e_H - \hat{e}'_H)/\hat{e}'_H$ pada na $\sim 2\%$ (Slika A1b). Sažimajući, ako su zadani σ_U, μ_U i σ_θ , e_H se može procijeniti primjenom (A1) uz faktor ispravka (A3).



Slika A1: (a) Primjer pogreške procjene R (jednačba A1) i izmjerenih podataka na tornju u zaleđu Rijeke na visini od 25 m iznad tla za promatrani događaj bure (Poglavlja 4.1.1 i 4.2.1). **(b)** pogreška procjene R' . Raspodjela podataka na ostalim razinama na tornju (50, 75 i 98 m iznad tla) je slična, pa ovdje nije prikazana.

Napomena – zato jer je θ kružna varijabla, način na koji zapisivač podataka (ZP) računa σ_θ je važan. Algoritam koji ZP koristi pri računanju σ_θ glasi:

1. za svaki 1 Hz podatak unutar 10-min perioda računa se sinus i kosinus smjera vjetra,
2. izračunaju se njihove usrednjene vrijednosti ($\overline{\sin\theta}$ i $\overline{\cos\theta}$) te standardne devijacije ($\sigma_{\sin\theta}$ i $\sigma_{\cos\theta}$), i
3. izračuna se vektor koji predstavlja usrednjenu vrijednost i standardnu devijaciju smjera vjetra.

Ova metoda slična je metodi Verrall i Williams (1982).

A2 Određivanje sinoptičkog tipa bure

Brzina i trajanje bure ovise, između ostalog, o sinoptičkom tipu bure: ciklonalnom, anticiklonalnom ili frontalnom (Defant 1951; Jurčec 1988). Za klasifikaciju tipa vremena tijekom događaja bure koristi se metoda opisana u Poje (1965). Ova metoda trenutno se koristi u operativnoj prognozi na Državnom Hidrometeorološkom Zavodu (DHMZ). Uz karte prizemnog tlaka zraka i geopotencijalne visine na 500 mb, ovom metodom moguće je razlikovati 29 tipova vremena, od kojih je pet ciklonalnih (C), a pet anticiklonalnih (AC). U ovom radu klasifikacija je pojednostavljena. Ako je stanje atmosfere tijekom događaja bure u nekoj od pet ciklonalnih (anticiklonalnih) kategorija, jednostavno je označeno kao ciklonalno (anticiklonalano), tj. kategorije C1–C5 (AC1–AC5) grupirane su u jednu C (AC) kategoriju. Detaljan opis svake od C1–C5 i AC1–AC5 kategorija se nalazi se u Poje (1965). Pri

određivanju sinoptičkog tipa bure, korištene su karte Detusche Wetterdienst (https://www.wetter3.de/animation_dt.html).

A3 Rotacijski spektri i vrtložnost

Neka se linearne perturbacije zonalne i meridionalne komponente brzine vjetra (u' i v') mogu prikazati kao ravni, putujući valovi, i neka je $v'/u' = \gamma$, $\gamma \in \mathbb{C}$. Vertikalna komponenta vrtložnosti jednaka je

$$\zeta' = \frac{\partial v'}{\partial x} - \frac{\partial u'}{\partial y} = i(kv' - lu'). \quad (A4)$$

Umnoškom ovog izraza s njegovim kompleksnim konjugatom dobije se izraz za spektar gustoće snage vertikalne komponente vrtložnosti (S_ζ):

$$S_\zeta = k^2 S_v + l^2 S_u - 2kl\Re(\gamma), \quad (A5)$$

gdje su S_u i S_v spektri gustoće snage komponenti brzine vjetra, a S_{uv} je njihov kospektar, tj. realni dio kompleksne kovarijance G_{uv} jednake

$$G_{uv} = u'v'^* = S_{uv} - iQ_{uv}. \quad (A6)$$

Q_{uv} je spektar kvadrature (npr. Stull 1988). Prema tome, S_ζ se može izraziti pomoću spektara i kospektara komponenti brzine vjetra. Rotacijski parametar R_{ab} (Poglavlje 4.3.3) se sukladno može izraziti (Gonella 1972) kao

$$R_{ab} = \frac{\sqrt{S_u + S_v + 2Q_{uv}} - \sqrt{S_u + S_v - 2Q_{uv}}}{\sqrt{S_u + S_v + 2Q_{uv}} + \sqrt{S_u + S_v - 2Q_{uv}}}. \quad (A7)$$

Kako S_ζ i R_{ab} ovise o parametru γ , tj. omjeru v' i u' ? S_v , S_{uv} i Q_{uv} se mogu izraziti pomoću S_u , tako da je $S_v = |\gamma|^2 S_u$, $S_{uv} = \Re(\gamma)S_u$ i $Q_{uv} = -\Im(\gamma)S_u$. Ako je gibanje pravocrtno, γ je realan i $\gamma = l/k$ (Poglavlje 5.3.3). U tom slučaju kvadratura iščezava, pa R_{ab} i S_ζ također iščezavaju. Prema tome, ako postoji horizontalna rotacija (tj., $|R_{ab}| > 0$), to povlači i postojanje vrtložnosti ($S_\zeta > 0$). Za ekstreman slučaj kružnog gibanja γ je jednak $\pm i$, kospektar iščezava te vrijedi

$$S_\zeta = 2S_u l^2 = 2|Q_{uv}|l^2. \quad (A8)$$

U ovom slučaju S_ζ je izravno proporcionalan apsolutnoj vrijednosti kvadrature, a magnituda R_{ab} postiže najveću vrijednost ($|R_{ab}| = 1$). Treba naglasiti da jednadžbe A5–8 strogo vrijede samo ako se u' , v' i ζ' na nekoj frekvenciji mogu približno predstaviti ravnim, putujućim valovima.

ŽIVOTOPIS

Petar Golem rođen je 9. srpnja 1996. godine u Zadru. Pohađao je gimnaziju Franje Petrića u Zadru od 2011. do 2015. godine, nakon čijeg završetka je upisao studij Fizike na Prirodoslovno-matematičkom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu. Na studiju Geofizike, usmjerenja Meteorologija i fizička oceanografija, diplomirao je 2020. godine s temom „Analiza vertikalnih strujanja u tropskom konvektivnom graničnom sloju tijekom mjerne kampanje DACCIWA“. Nakon diplomiranja, 2021. godine zapošljava se kao asistent na projektu „Opterećenje vjetrova i mora na energetske konstrukcije – WESLO“ Fakulteta strojarstva i brodogradnje, istovremeno upisujući poslijediplomski doktorski studij na Prirodoslovno-matematičkom fakultetu, smjer Fizika atmosfere. Rezultate rada objavio je u tri znanstvena članka u časopisima zastupljenima u *Current Contents*. Član je Hrvatskog meteorološkog društva.

Izvorni znanstveni radovi u časopisima indeksiranim u *Current Contents* (kronološki poredak):

1. 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. *Boundary-Layer Meteorology*, 183, 495–504. doi: 10.1007/s10546-022-00689-7
2. Golem, P., Večenaj, Ž., Kozmar, H., Grisogono, B. (2023) The effect of orography on bora wind turbulence. *Boundary-Layer Meteorology*, 187, 193–212. doi: 10.1007/s10546-022-00767-w
3. Golem, P., Večenaj, Ž., Kozmar, H., Grisogono, B. (2024) Misalignment between the propagation direction of the bora wind and its pulsations. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 150(759), 1194–1205. doi: <http://dx.doi.org/10.1002/qj.4679>

Sudjelovanje na konferencijama (kronološki poredak):

1. Golem, P., Večenaj, Ž., Kozmar, H., Grisogono, B. (2022) Systematic differences in moderate to severe Bora upwind and downwind turbulence. *Kratki sažetci*, str. 42–42
2. Golem, P., Toman, I., Večenaj, Ž., Kozmar, H., Grisogono, B. (2022) Windward measurements and WRF simulation of a long-lasting severe Bora event. *Kratki sažetci*, str. 58–58

3. Golem, P., Večenaj, Ž., Kozmar, H., Grisogono, B. (2023) Characteristics of bora pulsations in the lee of the Dinaric Alps. 36th International Conference on Alpine Meteorology (online). St. Gallen, Švicarska, 19.06.2023–27.06.2023

Međunarodne radionice i usavršavanja:

1. COST FAIRNESS Summer School 2024: Training in Micrometeorological Measurements and Applications. Budimpešta, Mađarska, 10. lipnja – 15. lipnja 2024.

Recenzentski rad u časopisima indeksiranim u *Current Contents*:

Srpanj 2024. – recenziranje članka za *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*.

LITERATURA

- Águstsson, H., Ólafsson H. (2014) Simulations of Observed Lee Waves and Rotor Turbulence. *Monthly Weather Review*, 142(2), 832–49. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-13-00212.1>.
- Babić, N. (2013). *Proučavanje Turbulentnih Tokova Bure u Navjetrini Splita*. Diplomski rad. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet.
- Babić, N., Večenaj, Ž., Kozmar, H., Horvath, K., De Wekker, S. F. J., Grisogono, B. (2016a) On Turbulent Fluxes During Strong Winter Bora Wind Events. *Boundary-Layer Meteorology*, 158(2), 331–350. <https://doi.org/10.1007/s10546-015-0088-7>.
- Babić, N., Večenaj, Ž., De Wekker, S.F.J. (2016b) Flux-variance similarity in complex terrain and its sensitivity to different methods of treating non-stationarity. *Boundary-Layer Meteorology* 159(1): 123–145. <https://doi.org/10.1007/s10546-015-0110-0>.
- Batchelor, G. K. (1959) *The Theory of Homogeneous Turbulence*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Belušić, D., Pasarić, M., Orlić, M. (2004) Quasi-Periodic Bora Gusts Related to the Structure of the Troposphere. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 130, 1103–1121. <https://doi.org/10.1256/qj.03.53>.
- Belušić, D., Klaić, Z. B. (2006) Mesoscale Dynamics, Structure and Predictability of a Severe Adriatic Bora Case. *Meteorologische Zeitschrift*, 15(2), 157–68. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0116>.
- 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. *Meteorologische Zeitschrift*, 15 (3), 301–306. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0127>.
- Belušić, D., Žagar, M., Grisogono, B. (2007) Numerical Simulation of Pulsations in the Bora Wind. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 133, 1371–1388. <https://doi.org/10.1002/qj>.
- Belušić, D., Hrastinski, M., Večenaj, Ž., Grisogono, B. (2013) Wind Regimes Associated with a Mountain Gap at the Northeastern Adriatic Coast. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 52(9), 2089–2105. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-12-0306.1>.
- Bendat, J. S., Piersol, A. G. (1986) *Random Data: Analysis and Measurement Procedures*. New York, USA: John Wiley and Sons Inc.
- Bougeault, P., Binder, P., Buzzi, A., Dirks, R., Houze, R., Kuettner, J., Smith, R. B., Steinacker, R., Volkert, H. (2001) The MAP Special Observing Period. *Bulletin of the*

- American Meteorological Society*, 82, 433–462.
- Brighton, P. W. M. (1978) Strongly Stratified Flow Past Three-Dimensional Obstacles. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 104(440), 289–307.
- Champagne, F. H. (1978) The Fine-Scale Structure of the Turbulent Velocity Field. *Journal of Fluid Mechanics*, 86(1), 67–108.
- Clark, T. L., Farley, R. D. (1984) Severe Downslope Windstorm Calculations in Two and Three Spatial Dimensions Using Anelastic Interactive Grid Nesting: A Possible Mechanism for Gustiness. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 41(3), 329–350.
- Clark, T. L., Hall, W. D. (1994) Two- and Three Dimensional Simulations of the 9 January 1989 Severe Boulder Windstorm: Comparison with Observations. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 51(6), 2317–2343.
- Counihan, J. (1975) Adiabatic Atmospheric Boundary Layers: A Review and Analysis of Data from the Period 1880–1972. *Atmospheric Environment*, 9, 871–905.
- Deardorff, J. W. (1980) Stratocumulus-Capped Mixed Layers Derived from a Three-Dimensional Model. *Boundary-Layer Meteorology*, 18, 495–527.
<https://doi.org/10.1007/BF00119502>.
- Defant, F. (1951) Local Winds. U: Malone, T. F. (ur.), *Compendium of Meteorology*. Boston MA, USA: American Meteorological Society, str. 655–672.
- Dudhia, J. (1989) Numerical Study of Convection Observed during the Winter Monsoon Experiment Using a Mesoscale Two-Dimensional Model. *Journal of Atmospheric Sciences*, 46, 3077–3107.
- Enger, L. Grisogono, B. (1998) The response of bora-type flow to sea surface temperature. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 124, 1227–1244.
- ESDU (1976) *Characteristics of Atmospheric Turbulence near the Ground. Part I: Definitions and General Information (Data Item No. 74030)*. London, UK: Great Britain Engineering Science Data Unit.
- (1985) *Characteristics of Atmospheric Turbulence near the Ground. Part II: Single Point Data for Strong Winds (Neutral Atmosphere; Data Item No. 85020)*. London, UK: Great Britain Engineering Science Data Unit.
- Gage, K. S. (1979) Evidence for a $-5/3$ Law Inertial Range in Mesoscale Two-Dimensional Turbulence. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 36, 1959–1954.
- Gohm, A., Mayr, G. J. (2005a) Numerical and Observational Case-Study of a Deep Adriatic Bora. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 131, 1363–1392.
<https://doi.org/10.1256/qj.04.82>.

- Gohm, A., Mayr., G. J. (2005b) On the Bora Breakthrough near a Mountain Gap. *Croatian Meteorological Journal*, 1, 217–220.
- 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. *Boundary-Layer Meteorology*, 183(3), 495–504. <https://doi.org/10.1007/s10546-022-00689-7>.
- Golem, P., Večenaj, Ž., Kozmar, H., Grisogono, B. (2023) The Effect of Orography on Bora Wind Turbulence. *Boundary-Layer Meteorology*, 187, 193–212. <https://doi.org/10.1007/s10546-022-00767-w>.
- Golem, P., Večenaj, Ž., Kozmar, H., Grisogono, B. (2024) Misalignment between the propagation direction of the bora wind and its pulsations. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 150(759), 1194–1205. doi: <http://dx.doi.org/10.1002/qj.4679>
- Gonella, J. (1972) A Rotary-Component Method for Analysing Meteorological and Oceanographic Vector Time Series. *Deep-Sea Research and Oceanographic Abstracts*, 19(12), 833–846. [https://doi.org/10.1016/0011-7471\(72\)90002-2](https://doi.org/10.1016/0011-7471(72)90002-2).
- Gossard, E. E., Hooke, W. H. (1975) *Waves in the Atmosphere: Atmospheric Infrasound and Gravity Waves - Their Generation and Propagation*. New York: Elsevier.
- Grisogono, B., Enger, L. (2004) Boundary-Layer Variations Due to Orographic-Wave Breaking in the Presence of Rotation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 130, 2991–3014. <https://doi.org/10.1256/qj.03.190>.
- Grisogono, B., Kraljević, L., Jeričević, A. (2007) The Low-Level Katabatic Jet Height versus Monin-Obukhov Height. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 133, 2133–2136. <https://doi.org/10.1002/qj.190>.
- Grisogono, B., Belušić, D. (2009) A Review of Recent Advances in Understanding the Meso- and Microscale Properties of the Severe Bora Wind. *Tellus, Series A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 61(1), 1–16. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0870.2008.00369.x>.
- Grubišić, V. (2004) Bora-Driven Potential Vorticity Banners over the Adriatic. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 130, 2571–2603. <https://doi.org/10.1256/qj.03.71>.
- Haurwitz, B. (1947) Internal Waves in the Atmosphere and Convection Patterns. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 48(8), 727–748. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1947.tb38487.x>.
- Heimann, D. (2001) A Model-Based Wind Climatology of the Eastern Adriatic Coast.

- Meteorologische Zeitschrift*, 10(1), 5–16. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2001/0010-0005>.
- Hersebach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horanyi, A., Muñoz-Sabater, J. (2020) The ERA5 Global Reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999–2049.
- Hertenstein, R. F., Kuettner, J. P. (2005) Rotor types associated with steep lee topography: influence of the wind profile. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 57(2), 117–135.
- Hodges, J. L. (1958) The Significance Probability of the Smirnov Two-Sample Test. *Arkiv För Matematik*, 3(5), 469–486. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/bf02589501>.
- Holmes, J. D. (2015) *Wind Loading of Structures*. Boca Raton, Florida, USA: CRC press.
- Hong, S., Noh, Y., Dudhia, J. (2006a) A New Vertical Diffusion Package with an Explicit Treatment of Entrainment Processes. *Monthly Weather Review*, 134(9), 2318–2341. <https://doi.org/10.1175/MWR3199.1>.
- Hong, S., Lim, J. O. J. (2006b) The WRF Single-Moment 6-Class Microphysics Scheme (WSM6). *Journal of Korean Meteorological Society*, 42(2), 129–151.
- Honnert, R., Efstathiou, G. A., Beare, R. J., Ito, J., Lock, A., Neggers, R., Plant, R. S., Shin, H. H., Tomassini, L., Zhou, B. (2020) The Atmospheric Boundary Layer and the ‘Gray Zone’ of Turbulence: A Critical Review. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(13), 1–26. <https://doi.org/10.1029/2019JD030317>.
- Horvath, K., Večenaj, Ž., Grisogono, B. (2010a) *Preliminary Analysis of a Strong Mid-Adriatic Bora Event*. Lake Tahoe, California: 14th Conference on Mountain Meteorology. Dostupno na: https://ams.confex.com/ams/14MountMet/techprogram/paper_173689.htm [8. listopada 2024.]
- Horvath, K., Večenaj, Ž., Tomšić, D., Horvath, L., Grisogono, B., Bajić, A., Žibrat, Z., et al. (2010b) *The WINDEX Measurement Experiment*. Lake Tahoe, California: 14th Conference on Mountain Meteorology. Dostupno na: https://ams.confex.com/ams/14MountMet/techprogram/paper_173700.htm [8. listopada 2024.]
- Horvath, K., Večenaj, Ž., Grisogono, B. (2013) *Downslope windstorms over very complex orography: formation and development of pulsations*. Kranjska Gora, Slovenija: ICAM 2013 – International Conference on Alpine Meteorology. Dostupno na: http://www.gfz.hr/eng/meteorologija/caturbo/Workshop2014/T1.5._Bora_flow_over_the

_complex_terrain_Horvath.pdf [8. listopada 2024]

- HRN EN (1991) *Eurokod 1: Djelovanja na konstrukcije - Dio 1-4: Opća djelovanja - Djelovanja vjetra (EN 1991-1-4:2005+AC:2010+A1:2010)*. Zagreb, Hrvatska: Hrvatski zavod za norme, 142 str.
- Jurčec, V. (1988) Frontalni Tip Bure Na Jadranu. *Rasprave-Papers*, 23, 13–25.
- Jurković, J., Šeperić, L. G., Kos, I., Grisogono, B., Večenaj, Ž. (2018) *Small Mesoscale Features during Bora at Dubrovnik Airport*. Zagreb, Hrvatska: Meteorološki izazovi 6: Napredne tehnologije u rješavanju meteoroloških izazova. Dostupno na: <https://www.meteohmd.hr/files/file/Aktivnosti/MeteoIzazovi/MI6/Sazeci%20MI6-sve.pdf> [8. listopada 2024.]
- Kaimal, J. C., Wyngaard, J. C., Izumi, Y., Cote, O. R. (1972) Spectral Characteristics of Surface-Layer Turbulence. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 98, 563–89.
- Kaimal, J. C., Finnigan, J. J. (1994) *Atmospheric Boundary Layer Flows: Their Structure and Measurement*. New York: Oxford University Press.
- Keresturi, E. (2014) *Osobine Bure Na Zračnoj Luci Dubrovnik*. Diplomski rad. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet.
- Klaić, Z. B., Belušić, D. (2006) *Is Severe Adriatic Bora Associated with the Tropopause Fold?* Santa Fe, New Mexico: 12th Conference on Mountain Meteorology. Dostupno na: http://ams.confex.com/ams/SantaFe2006/techprogram/meeting_SantaFe2006.htm [8. listopada 2024.]
- Klemp, J. B., Durran, D. R. (1987) Numerical Modelling of Bora Winds. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 36, 215–227.
- Klemp, J. B. (2011) A Terrain-Following Coordinate with Smoothed Coordinate Surfaces. *Monthly Weather Review*, 139, 2163–2169.
- Kolmogorov, A. N. (1941) Dissipation of Energy in Locally Isotropic Turbulence. *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, 32, 16–18.
- Kozmar, H., Grisogono, B. (2021) Characteristics of Downslope Windstorms in the View of the Typical Atmospheric Boundary Layer. U: Hangan, H., Kareem, A. (ur.), *The Oxford Handbook of Non-Synoptic Windstorm Hazards*. Oxford: Oxford University Press, str. 85–114. <https://www.eol.ucar.edu>.
- Kuettner, J., O'Neill, T. H. R. (1981) ALPEX: The GARP Mountain Subprogram. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 67, 793–805.
- Kuzmić, M., Grisogono, B., Li, X., Lehner, S. (2015) Examining Deep and Shallow Adriatic

- Bora Events. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* [online], 141(693), 3434–3438. Dostupno na: <https://doi.org/10.1002/qj.2578> [23. kolovoza 2024.]
- Ladwig, W. (2017) wrf-python (Version 1.3.4.1) [online]. Boulder, Colorado: UCAR/NCAR. Dostupno na: <https://doi.org/10.5065/D6W094P1> [3. rujna 2024]
- Lenschow, D. H., Mann, J., Kristensen, L. (1994) How Long Is Long Enough When Measuring Fluxes and Other Turbulence Statistics? *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 11, 661–673. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(1994\)011<0661:HLILEW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(1994)011<0661:HLILEW>2.0.CO;2).
- Lepri, P., Večenaj, Ž., Kozmar, H., Grisogono, B. (2015) Near-Ground Turbulence of the Bora Wind in Summertime. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 147, 345–357. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2015.09.013>.
- Lepri, P., Večenaj, Ž., Kozmar, H., Grisogono, B. (2017) Bora Wind Characteristics for Engineering Applications. *Wind and Structures*, 24(6), 579–611. <https://doi.org/10.12989/was.2017.24.6.579>.
- Lepri, P. (2023) *Značajke Bure u Prizemnom Sloju Atmosfere Iznad Brdovitog Terena*. Doktorski rad. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet.
- Lisac, I. (2014) *Testiranje Teorije Sličnosti Na Ljetnoj Buri Srednjeg Jadrana*. Diplomski rad. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet.
- Liu, Y., Liu, Y., Muñoz-Esparza, D., Hu, F., Yan, C., Miao, S. (2020) Simulation of Flow Fields in Complex Terrain with WRF-LES: Sensitivity Assessment of Different PBL Treatments. *Source: Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 59(9), 1481–1501. <https://doi.org/10.2307/27071677>.
- Mahrt, L. (1998) Stratified Atmospheric Boundary Layers and Breakdown of Models. *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*, 11, 263–279. <https://doi.org/10.1007/s001620050093>.
- Mellor, G. L., Yamada, T. (1974) A Hierarchy of Turbulence Closure Models for Planetary Boundary Layers. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 31, 1791–1806.
- Mestayer, P. (1982) Local Isotropy and Anisotropy in a High-Reynolds-Number Turbulent Boundary Layer. *Journal of Fluid Mechanics*, 125, 475–503.
- Metcalf, J. I., Atlas, D. (1973) Microscale Ordered Motions and Atmospheric Structures Associated with Thin Echo Layers in Stably Stratified Zones. *Boundary-Layer Meteorology*, 4(4), 7–35. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/bf02265223>.
- Metzger, M., Holmes, H. (2008) Time Scales in the Unstable Atmospheric Surface Layer. *Boundary-Layer Meteorology*, 126(1), 29–50. <https://doi.org/10.1007/s10546-007-9219->

0.

- Mlawer, E. J., Steven, J. T., Patrick, D. B., Iacono, M. J., Clough, S. A. (1997) Radiative Transfer for Inhomogeneous Atmospheres: RRTM, a Validated Correlated-k Model for the Longwave. *Journal of Geophysical Research*, 102, 16663–11682.
- Mohorovičić, A. (1889) Interessante Wolkenbildung Über Der Bucht von Buccari (with a Comment from the Editor J. Hann). *Meteorologische Zeitschrift*, 24, 56–58.
- Muñoz-Esparza, D., Sauer, J. A., Linn, R. R., Kosović, B. (2016) Limitations of One-Dimensional Mesoscale PBL Parameterizations in Reproducing Mountain-Wave Flows. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 73(7), 2603–2614. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-15-0304.1>.
- Nakanishi, M., Niino, H. (2006) An Improved Mellor-Yamada Level-3 Model: Its Numerical Stability and Application to a Regional Prediction of Advection Fog. *Boundary-Layer Meteorology*, 119, 397–407.
- NASA/METI/AIST/Japan Spacesystems and U.S./Japan ASTER Science Team (2019) *ASTER Global Digital Elevation Model V003*. NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center. Dostupno na: <https://doi.org/10.5067/ASTER/ASTGTM.003>. [6. studeni 2024.]
- Nastrom, G. D., Gage, K. S. (1985) A Climatology of Atmospheric Wavenumber Spectra of Wind and Temperature Observed by Commercial Aircraft. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 42(9), 950–960. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1985\)042<0950:ACOAWS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1985)042<0950:ACOAWS>2.0.CO;2).
- Neiman, P. J., Hardesty, R. M., Shapiro, M. A., Cupp, R. E. (1988) Doppler Lidar Observations of a Downslope Windstorm. *Monthly Weather Review*, 116(11), 2265–2275. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1988\)116<2265:DLOAD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1988)116<2265:DLOAD>2.0.CO;2).
- Niu, G. Y., Yang, Z. L., Mitchell, K. E., Chen, F., Ek, M. B., Barlage, M., Kumar, A., et al. (2011) The Community Noah Land Surface Model with Multiparametrization Options (Noah-MP): 1. Model Description and Evaluation with Local-Scale Measurements. *Journal of Geophysical Research*, 116, D12109. doi:10.1029/2010JD015139.
- O'Brien, J. J., Pillsbury, D. R. (1974) Rotary Wind Spectra in a Sea Breeze Regime. *Journal of Applied Meteorology*, 13, 820–825.
- Ólafsson, H., Ágústsson, H. (2007) The Freysnes Downslope Windstorm. *Meteorologische Zeitschrift*, 16(1), 123–130. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2007/0180>.
- Oncley, S. P., Friehe, C. A., Businger, J. A., Itsweire, E. C., LaRue, J. C., Chang, S. S. (1966) Surface Layer Fluxes, Profiles and Turbulence Measurements over Uniform Terrain

- under near-Neutral Conditions. *Journal of Atmospheric Sciences*, 53, 1029–1044.
- Orlić, M., Belušić, D., Pasarić, Z. (2005) First Measurements of Bura Wind at Senj with a Three-Axis Anemometer. *Croatian Meteorological Journal*, 40, 308–311.
- Panofsky, H. A., Dutton, J. A. (1984) *Atmospheric Turbulence - Models and Methods for Engineering Applications*. New York: John Wiley and Sons Ltd.
- Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., Blondel, M., et al. (2011) Machine Learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*, 12, 2825–2830.
- Peltier, W. R., Scinocca, J. F. (1990) The Origin of Severe Downslope Windstorm Pulsations. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 47(24), 2853–2870. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1990\)047<2853:TOOSDW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1990)047<2853:TOOSDW>2.0.CO;2).
- Petkovšek, Z. (1987) Main Bora Gusts - a Model Explanation. *Geofizika*, 4, 41–50.
- Piper, M., Lundquist, J. K. (2004) Surface Layer Turbulence Measurements during a Frontal Passage. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 61(14), 1768–1780. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2004\)061<1768:SLTMDA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2004)061<1768:SLTMDA>2.0.CO;2).
- Poje, D. (1965) *Tipovi Vremena u Jugoslaviji i Njihova Ovisnost o Cirkulaciji Atmosfere Nad Jugoslavijom*. Doktorski rad. Sveučilište u Zagrebu.
- Poje, D. (1992) Wind persistence in Croatia. *International Journal of Climatology*, 12, 569–586.
- Prtenjak, M. T., Pasarić, Z., Orlić, M., Grisogono, B. (2008) Rotation of Sea/Land Breezes along the Northeastern Adriatic Coast. *Annales Geophysicae*, 26, 1711–1724.
- Rakovec, J. (1987) Preliminary Report on Spectral Characteristics of Bora on the Island of Rab. *Geofizika*, 4(1), 35–40.
- Roth, M. (2000) Review of Atmospheric Turbulence over Cities. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 126, 941–990. <https://doi.org/10.1256/smsqj.56408>.
- Rotunno, R., Bryan, G. H. (2020) Numerical Simulations of Two-Layer Flow past Topography. Part II: Lee Vortices. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 77(3), 965–980.
- Saha, S., Moorthi, S., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P., Behringer, D., et al. (2011) *NCEP Climate Forecast System Version 2 (CFSv2) 6-Hourly Products (updated daily)*. Boulder, Colorado: Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory. Dostupno na <https://doi.org/10.5065/D61C1TXF> [23. kolovoza 2024.]
- Schär, C., Smith, R. B. (1993) Shallow-Water Flow past Isolated Topography. Part I: Vorticity Production and Wake Formation. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 50(10),

1373–1400.

- Schär, C., Durran, D. R. (1997) Vortex Formation and Vortex Shedding in Continuously Stratified Flow past Isolated Topography. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 54(4), 534–554.
- Scinocca, J. F., Peltier, W. R. (1989) Pulsating Downslope Windstorms. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 46(18), 2885–2914. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1989\)046<2885:PDW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1989)046<2885:PDW>2.0.CO;2).
- Serafin, S., Adler, B., Cuxart, J., De Wekker, S. F. J., Gohm, A., Grisogono, B., Kalthoff, N., et al. (2018) Exchange Processes in the Atmospheric Boundary Layer over Mountainous Terrain. *Atmosphere*, 9(3), 102. <https://doi.org/10.3390/atmos9030102>.
- Shin, H. H., Hong, S. Y. (2015) Representation of the Subgrid-Scale Turbulent Transport in Convective Boundary Layers at Gray-Zone Resolutions. *Monthly Weather Review*, 143(1), 250–271. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-14-00116.1>.
- Simić, N. (2019) *Prognoziranje Udara Bure Na Temelju Izlaznih Polja Modela ALADIN Na Zračnoj Luci Dubrovnik*. Diplomski rad. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., O’Gill, D., Liu, Z., Berner, J., Wang, W., et al. (2021) *A Description of the Advanced Research WRF Model Version 4*. Boulder, Colorado: National Center for Atmospheric Research. <http://dx.doi.org/10.5065/1dfh-6p97> [23. kolovoza 2024.]
- Smagorinsky, J. (1963) General Circulation Experiments with the Primitive Equations: I. The Basic Experiment. *Monthly Weather Review*, 91, 99–164. [https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1963\)091<0099:GCEWTP>2.3.CO;2](https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0493(1963)091<0099:GCEWTP>2.3.CO;2).
- Smith, C. M., Skillingstad., E. D. (2011) Effects of Inversion Height and Surface Heat Flux on Downslope Windstorms. *Monthly Weather Review*, 139(12), 3750–3764. <https://doi.org/10.1175/2011MWR3619.1>.
- Smith, R. B. (1987) Aerial Observations of the Yugoslavian Bora. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 44(2), 269–297.
- Smolarkiewicz, P. K., Rotunno, R. (1988) Low Froude Number Flow Past Three-Dimensional Obstacles. Part I: Baroclinically Generated Lee Vortices. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 46(8), 1154–1164.
- Stiperski, I., Ivančan-Picek, B., Grubišić, V., Bajić, A. (2012) Complex Bora Flow in the Lee of Southern Velebit. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 138(667), 1490–1506. <https://doi.org/10.1002/qj.1901>.

- Stiperski, I., Calaf, M., Rotach, M. W. (2019) Scaling, Anisotropy, and Complexity in Near-Surface Atmospheric Turbulence. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124, 1428–1448. <https://doi.org/10.1029/2018JD029383>.
- Stull, R. B. (1988) *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Dordrecht; Boston; London: Kluwer Academic Publishers. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-3027-8>.
- Šinik, N., Grisogono, B. (2009) *Dinamička Meteorologija - Uvod u Opću Cirkulaciju Atmosfere*. Zagreb: Školska knjiga.
- 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(4), 116. <https://doi.org/10.3390/atmos9040116>.
- Tennekes, H., Lumley, J. L. (1972) *A First Course in Turbulence*. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press.
- Thuillier, R. H., Lappe, U. O. (1964) Wind and Temperature Profile Characteristics from Observations on a 1400 Ft Tower. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 3 (3), 299–306.
- Trošić, T., Trošić, Ž. (2010) Numerical simulation and observational analysis of the bora of Pag's ribs. *Boundary-Layer Meteorology*, 134(2), 353–366.
- Umek, L., Gohm, A., Haid, M., Ward, H. C., Rotach, M. W. (2021) Large-Eddy Simulation of Foehn–Cold Pool Interactions in the Inn Valley during PIANO IOP 2. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 147(735), 944–982. <https://doi.org/10.1002/qj.3954>.
- Večenaj, Ž., Belušić, D., Grisogono, B. (2007) *Estimation of Turbulence Kinetic Energy Dissipation Rate in a Bora Event*. Chambéry, France: 29th International Conference on Alpine Meteorology. Dostupno na: <https://www.croris.hr/crosbi/publikacija/prilog-skup/528603> [8. listopada 2024.]
- Večenaj, Ž. (2010) Characteristics of the Near-Surface Turbulence during a Bora Event. *Annales Geophysicae*, 28, 155–63. www.ann-geophys.net/28/155/2010/.
- . (2012) *Characteristics of the Bora Related Turbulence*. Doktorski rad. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet.
- Večenaj, Ž., Belušić, D., Grubišić, V., Grisogono, B. (2012) Along-Coast Features of Bora-Related Turbulence, *Boundary-Layer Meteorology*, 143(3), 527–45. <https://doi.org/10.1007/s10546-012-9697-6>.
- Večenaj, Ž., De Wekker, S. F. J. (2015) Determination of Non-Stationarity in the Surface Layer during the T-REX Experiment. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological*

- Society*, 141(690), 1560–1571. <https://doi.org/10.1002/qj.2458>.
- Večenaj, Ž. (2015) *Bora-Induced near-Surface Layer Turbulence Scales*. Innsbruck, Austrija: ICAM 2015 – 33rd International Conference on Alpine Meteorology. Dostupno na: https://www.uibk.ac.at/congress/icam2015/abstracts_poster_presentations.htm#P2.10 [8. listopada 2024.]
- Večenaj, Ž., Počakal, D., Hegeduš, H., Grisogono, B. (2015) *A New Micrometeorological Research Facility at the New Maslenica Bridge*. Osijek, Hrvatska: GEWEX workshop on the climate systems of the Pannonian basin – PANNEX. Dostupno na: <https://www.croris.hr/crosbi/publikacija/prilog-skup/629552> [8. listopada 2024.]
- Večenaj, Ž., Prtenjak, M. T., Grisogono, B. (2019) *WRF-ARW Simulations of Shallow and Deep Bora Flows at the Dubrovnik Airport, Croatia*. Riva del Garda, Italija: ICAM – 35th International Conference on Alpine Meteorology. Dostupno na: https://www.bib.irb.hr:8443/1037741/download/1037741.poster_2_zac.pdf [8. listopada 2024.]
- Večenaj, Ž., Malečić, B., Grisogono, B. (2021) Estimation of Turbulent Triplet Covariances for Bora Flows. *Fluids*, 6, 452. <https://doi.org/10.3390/fluids6120452>.
- Verrall, K. A., Williams, R. L. (1982) A Method for Estimating the Standard Deviation of Wind Direction. *Journal of Applied Meteorology*, 21, 1922–25.
- Vickers, D., Mahrt, L. (2003) The Cospectral Gap and Turbulent Flux Calculations. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 20, 660–672.
- Vozila, A. B., Prtenjak, M. T., Güttler, I. (2021) A Weather-Type Classification and Its Application to near-Surface Wind Climate Change Projections over the Adriatic Region. *Atmosphere*, 12, 948. <https://doi.org/10.3390/atmos12080948>.
- Welch, P. (1967) The Use of Fast Fourier Transform for the Estimation of Power Spectra: A Method Based on Time Averaging over Short, Modified Periodograms. *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, 15(2), 70–73. <https://doi.org/10.1109/TAU.1967.1161901>.
- Wyngaard, J. C. (2010) *Turbulence in the Atmosphere*. New York: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511840524>.
- Yoshino, M. M. (1976) Local Wind Bora: A Research Summary. U: Yoshino, M. M. (ur.), *Local Wind Bora*. University of Tokio Press, str. 277–282.
- Zajec, A. (2022) *Prva analiza mikroskalnih karakteristika juga*. Diplomski rad. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet.
- Zhang, X., Bao, J. W., Chen, B., Grell, E. D. (2018) A Three-Dimensional Scale-Adaptive

Turbulent Kinetic Energy Scheme in the WRF-ARW Model. *Monthly Weather Review*, 146(7), 2023–2045. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-17-0356.1>.

Zheng, Y., Alpaty, K., Herwehe, J. K., Del Genio, A. D., Niyogi, D. (2016) Improving High-Resolution Weather Forecasts Using the Weather Research and Forecasting (WRF) Model with an Updated Kain-Fritsch Scheme. *Monthly Weather Review*, 114, 833–860.

Zipser, E.J., Bedard, A. J. (1982) Front Range Windstorms Revisited. *Weatherwise*, 35, 82–85.