

Analiza vjetra na Mikrometeorološkoj postaji Maslenica

Hercigonja, Lana

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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:217:342531>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-28**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

Lana Hercigonja

Analiza vjetra na Mikrometeorološkoj postaji
Maslenica

Diplomski rad

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ FIZIKA-GEOFIZIKA
SMJER: METEOROLOGIJA I FIZIČKA OCEANOLOGRAFIJA

Lana Hercigonja

Diplomski rad

Analiza vjetra na Mikrometeorološkoj postaji Maslenica

Voditelj diplomskog rada: doc. dr. sc. Željko Večenaj

Zagreb, 2022.

Svojem mentoru doc. dr. sc. Željku Večenaju upućujem zahvalu prvenstveno na usmjeravanju i konstruktivnim kritikama, zatim i na strpljenju i povjerenju u nove ideje koje su s moje strane nastajale svako malo tijekom ovog istraživanja. Zahvaljujem se DHMZ-u na ustupljenim meteorološkim podacima bez kojih bi polovica ovog rada bila neostvariva. Također hvala i dr. sc. Iris Odak Plenković na prenesenim vještinama programiranja koje su znatno doprinjele kvaliteti ovih analiza, kao i skratile vrijeme izvršavanja mojih programa.

Naposlijetku, želim se zahvaliti svim dragim osobama koje su vjerovala u mene i podupirale me tijekom studija. Svatko bi uz sebe trebao imati nekog poput njih!

Sažetak

Bura i jugo najizraženiji su olujni vjetrovi istočne Jadranske obale. Mogu se klasificirati po sinoptičkom tipu na anticiklonalni, ciklonalni i frontalni tip, a po tipu strujanja bura može biti plitka ili duboka. Svaki sinoptički tip vjetra povezan je sa svojstvenim vremenskim prilikama. Predmet ovog istraživanja je strujanje registrirano na novoj Mikrometeorološkom postaji Maslenica. Na toj lokaciji u općem pregledu mogu se prepoznati dva dominantna vjetra uzrokovana sinoptičkim poremećenjima; bura je najjači i najdugotrajniji vjetar, a slijedi ju jugo. U radu prvo analiziramo epizode jake bure i juga, čije su karakteristike u skladu s očekivanima. Zatim se bavimo izraženim sjeverozapadnjakom dnevnog hoda u ljetnoj sezoni koji se ne može objasniti klasičnim modelom obalne cirkulacije. Stoga postavljamo novu hipotezu o termalno vođenoj cirkulaciji duž Velebitskog kanala koja bi mogla objasniti mehanizam čija je posljedica registrirano ljetno strujanje.

Cljučne riječi: bura, jugo, sinoptički tip vjetra, termalna cirkulacija

Wind analysis at the Maslenica micrometeorological station

Abstract

Bora and sirocco are the most prominent severe winds of the eastern Adriatic coast. With respect to the synoptic setup, we can identify anticyclonic, cyclonic and frontal winds and, specifically for bora, deep and shallow flow type. Each synoptic wind type is associated with specific weather conditions. This research is focused on wind flow at the new Maslenica micrometeorological station. In the general wind overview, on this location we noticed two dominant winds caused by synoptic disturbances; bora is the strongest and longest-lasting wind, followed by sirocco. In this research we analyze strong bora and sirocco episodes, whose characteristics we find as expected. Next, the prominent northwesterly diurnal flow in the summer season is of interest, which can not be explained by the standard model of land-sea breeze circulation. Therefore, we propose a new hypothesis about the thermally driven circulation along the Velebit strait which could explain the mechanism resulting in this summer wind flow.

Keywords: bora, sirocco, synoptic wind type, thermal circulation

Sadržaj

| | |
|--|-----------|
| 1. Uvod | 1 |
| 1.1. <i>Olujni vjetrovi</i> | 1 |
| 1.2. <i>Termalne cirkulacije – cirkulacija obale, obronka i doline</i> | 2 |
| 1.3. <i>Motivacija i cilj istraživanja</i> | 3 |
| 2. Podaci i metode | 4 |
| 2.1. Podaci s Mikrometeorološke postaje Maslenica | 4 |
| 2.2. Podaci s meteorološke postaje Zadar-Zemunik | 5 |
| 2.3. Sinoptičke karte | 5 |
| 3. Opći pregled vjetra kod Maslenice | 6 |
| 3.1. Ruže vjetra | 6 |
| 3.2. Tablice relativnih čestina | 8 |
| 4. Epizode jakog vjetra | 10 |
| 4.1. Bura | 11 |
| 4.1.1. Anticiklonalna bura | 11 |
| 4.1.2. Ciklonalna bura | 14 |
| 4.1.3. Frontalna bura | 16 |
| 4.2. Jugo | 18 |
| 5. Cirkulacija duž Velebitskog kanala | 21 |
| 6. Zaključak | 25 |
| Literatura | 27 |
| Popis kratica | 29 |
| Dodatak A Vektor dijagrami | 30 |

1. Uvod

1.1. *Olujni vjetrovi*

Istočna obala Jadrana ističe se po dva svjetski poznata olujna vjetra koje lokalno stanovništvo naziva bura i jugo (npr. Poje, 1992; Večenaj, 2005). Tim vjetrovima znanstvena zajednica već desetljećima posvećuje pažnju s ciljem interpretacije njihove dinamike u svrhu unapređenja prometnih, infrastrukturnih, poljoprivrednih, turističkih, vatrogasnih, vjetroenergetskih, znanstvenih i mnogih drugih djelatnosti.

Bura je snažan, relativno hladan i suh vjetar koji mahovito puše iz sjeveroistočnog kvadranta, na zavjetrinskoj strani primorskih planina poput Dinarida (npr. Penzar i sur., 2001). Spada u kategoriju jakih zavjetrinskih oluja čije mehanizme uglavnom objašnjava hidraulička teorija o kojoj se može više saznati iz npr. Grisogono i Belušić (2009). Trajanja do nekoliko dana, s udarima preko 55 m s^{-1} (npr. Belušić i Benčić Klaić, 2006, Bajić, 2011), bura je najpoznatiji vjetar istočne obale Jadranskog mora. Po sinoptičkom tipu razlikujemo ciklonalnu i anticiklonalnu buru prema Defant (1951) te frontalnu buru prema Jurčec (1988). Ciklonalni tip bure puše kad nad južnim Jadranom ili središnjim Mediteranom dominira polje niskog tlaka, a nad kontinentom polje visokog tlaka. Tada hladan zrak koji struji s kontinenta prema Jadranskoj obali donosi oblačno, ponekad i kišno vrijeme, pa se ponekad koristi i naziv "tamna" bura. Važno je napomenuti da oblaci i oborina povezani s ciklonalnom burom ne nastaju u hladnom i suhom zraku koji se spušta, već u relativno toplom zraku koji je zbog bure potaknut na uzdizanje (Penzar i sur., 2001). Češći, anticiklonalni tip bure, pojavljuje se kad jaka anticiklona dominira u središnjoj Europi i doseže sve do Dinarida, a nad istočnim Mediteranom može postojati relativno niski tlak. Takva je bura snažnija i mahovitija od ciklonalne, a prati ju suho i vedro vrijeme, pa ju poznajemo i pod imenom "jasna" bura. Frontalna bura nije povezana s izraženim baričkim sustavima nad Mediteranom, već je posljedica iznenadnog nailaska hladnog zraka povezanog s pomicanjem prizemne hladne fronte iz smjera sjeveroistoka. Takvu buru karakterizira vrlo nagli porast brzine i relativno kratko trajanje. Osim po sinoptičkom tipu, buru možemo razlikovati i po vertikalnoj strukturi strujanja: u principu, postoji duboka i plitka bura, ovisno o tome koliko visoko u troposferu doseže strujanje iz smjera bure. U slučaju plitke bure, strujanje je zadržano u nižoj troposferi. Ako strujanje dopire do srednje troposfere i više (minimalno do 500 hPa), govorimo o dubokoj buri (npr. Šoljan i sur., 2018).

Jugo je topao i vlažan gradijentni vjetar koji, modificiran oblikom terena, puše iz jugoistočnog kvadranta. Relativno je čest na cijelom Jadranu jer se pojavljuje na prednjoj strani ciklona koje često nastaju u zapadnom Sredozemlju (primjerice u Genovskom zaljevu) i Europi te se kreću prema istoku (npr. Penzar i sur., 2001). Drugi

je najizraženiji vjetar Jadrana, a udari mu mogu doseći brzinu i do 40 m s^{-1} (npr. Ivančan-Picek i sur., 2006). Poput bure, i jugo možemo klasificirati po sinoptičkom tipu na ciklonalno i anticiklonalno, te su oba tipa poznata po karakterističnom vremenu koje donose. Ciklonalno jugo nastaje u toplom sektoru ciklone smještene sa zapadne strane Jadrana te donosi vlažno i oblačno vrijeme s mnogo oborine, iz kojeg je razloga dobio i naziv "tamno" jugo. S druge strane, anticiklonalno jugo puše kad postoji visoki tlak nad Balkanskim poluotokom ili istočnim Mediteranom. Taj tip juga rjeđi je (npr. Lisac i sur., 1999) i donosi toplo i relativno suho (u odnosu na ciklonalno) vrijeme te traje duže.

1.2. Termalne cirkulacije – cirkulacija obale, obronka i doline

U slučaju mirne sinoptičke situacije, kao posljedica horizontalnog diferencijalnog zagrijavanja mogu se primijetiti termalno forsirane cirkulacije u priobalju (obalna cirkulacija) i u blizini planina (cirkulacija obronka i doline). Zbog različitog toplinskog kapaciteta, more i kopno različito se zagrijevaju i hlade tijekom dana odnosno noći. Ta razlika posebice je izražena ljeti kad dolazi najviše topline od Sunca, a dnevni hod temperature u prosjeku ima najveću amplitudu. Tako se u blizini obale danju kopno zagrije više od mora. Topliji zrak nad kopnom uzdiže se, te ga zbog horizontalnog gradijenta tlaka pri tlu nadomješta hladniji zrak koji se spušta i struji iz smjera mora. Cirkulacija se zatvara na visini nešto slabijim strujanjem u suprotnom smjeru. Takvo dnevno prizemno strujanje zovemo zmorac. Noću, kad je kopno hladnije od mora zbog bržeg radijacijskog hlađenja, smjer obalne cirkulacije je obrnut i tada govorimo o kopnenjaku. Dnevno strujanje i dnevna cirkulacijska ćelija viša je nego noću (npr. Prtenjak, 2006) te je zbog većih temperaturnih razlika zmorac jači od kopnenjaka. Zbog neposredne blizine planina uz Jadransku obalu na strujanje obalne cirkulacije superponira se utjecaj i termalne cirkulacije obronka. Danju se zrak uz planinski obronak zagrije više i brže nego okolni zrak što rezultira strujanjem uz obronak, odnosno u smjeru dublje prema kopnu. Noću se zrak uz obronak više ohladi pa se javlja silazni vjetar koji u slučaju Jadrana struji prema moru. Cirkulacija doline javlja se u područjima koja su okružena uzvisinama. Tamo tijekom dana uz njihove obronke zrak struji prema gore, pa se u dolini divergencija nadomješta zrakom s visine. Noću, kad zbog cirkulacije obronka zrak struji prema dolje i nakuplja se u dolini, javlja se nešto slabije uzlazno gibanje iz doline.

Dnevni hod vjetra može se vrlo praktično i intuitivno prikazati pomoću hodografa u vremenskoj domeni na kojem se svaka točka odnosi na srednji vektor vjetra u pojedinom satu. Brojne studije poput Kusuda i Alpert (1983) te Orlić i sur. (1988) pokazale su da neporemećeni vektor vjetra obalne cirkulacije na sjevernoj hemisferi opisuje elipsu u smjeru kazaljke na satu. Međutim, na nekim lokacijama kao što je

Senj (npr. Lukšić, 1989; Prtenjak, 2003) primijećeno je zakretanje vjetra obrnuto od smjera kazaljke tijekom cijelog dana ili u dijelu dana. Spomenuti autori zaključili su da je takvo ponašanje vjetra posljedica složenog utjecaja orografije. Prema Lukšić (1989), za slučaj u Senju to se odnosi na kompliciranu superpoziciju obalne cirkulacije zbog blizine mora, cirkulacije obronka zbog blizine Velebita, cirkulacije doline zbog blizine Senjske drage te zaljevske cirkulacije u Kvarneru.

1.3. Motivacija i cilj istraživanja

Do sada na lokacijama u blizini Maslenice postoji nekoliko istraživanja, a s obzirom na visokofrekventna mjerenja ta istraživanja bave se mikroskalnom analizom vjetra: Šoljan i sur. (2018) istražuju mikroskalne karakteristike raznih tipova bure, a Zajec (2022) daje prvu mikroskalnu analizu jakog juga. Stoga je ovaj rad prvi koji pruža statistički i sinoptički pregled strujanja na tom području na temelju mjerenja duljih od godinu dana, pa može biti početna točka budućim istraživanjima vjetra sjeveroistočnog Jadrana.

Mjerna postaja smještena je između starog i novog Masleničkog mosta, što je atraktivna lokacija za prikup podataka s obzirom na probleme koje jaka i olujna bura stvara na tom području. Zbog jakog vjetra često su prometnice i mostovi hrvatske obale zatvoreni za promet, a novi je Maslenički most jedan je od najčešće zatvaranih. Prema podacima Hrvatskih autocesta (Gašpar, 2019) u razdoblju od 2008. do 2019. most je ukupno bio zatvoren čak 7126 h, što je gotovo 7 % ukupnog vremena. Detaljnija istraživanja o utjecaju bure na Maslenički most mogu se naći u Radić i sur. (2003) te Sesar i Krečak (2005), a njihov glavni zaključak je da taj most nije izgrađen u skladu s režimom vjetra pod čijim se agresivnim utjecajem nalazi. Upravo tu leži dio motivacije za ovaj rad – pružiti opći pregled vjetra kod Maslenice, što može biti korisno pri daljnjim istraživanjima za razvitak prometne infrastrukture i poljoprivrede. Osim toga, može poslužiti i istraživanjima o razvoju požara i polutanata, s obzirom na to da rad posebnu pažnju pridaje ljetnom, termalno vođenom režimu strujanja koje je dominantno u razdoblju požarne sezone.

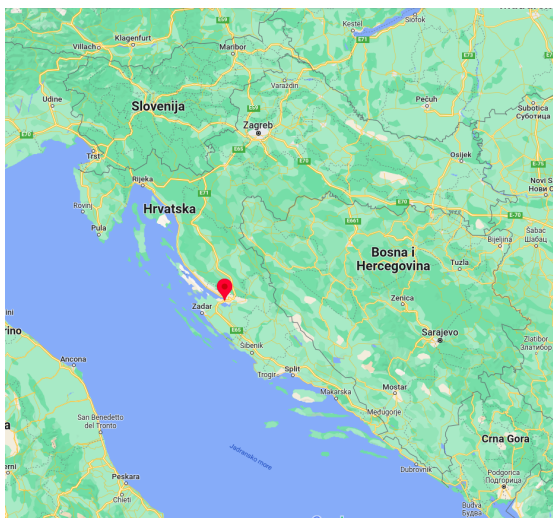
Ovaj rad, nakon općeg statističkog pregleda, bavi se epizodama jakog vjetra – istraživanjem karakteristika vjetra i povezanih vremenskih prilika. Bura i jugo klasificirat će se po sinoptičkom tipu i zatim se po jedan reprezentativni primjer svakog tipa vjetra sinoptički analizirati i dovesti u vezu s trendovima temperature i vlage. Dodatno, istražiti će se i ponuditi objašnjenje za izraženi vjetar dnevnog hoda u ljetnoj sezoni, a koji nije klasičan slučaj cirkulacije obale.

2. Podaci i metode

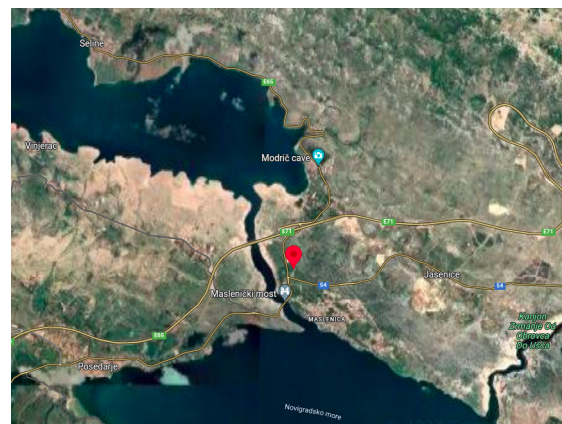
U ovom radu predmet istraživanja je vjetar u blizini Maslenice u razdoblju od listopada 2020. do studenog 2021. godine. Korišteni podaci o vjetru u tom razdoblju dobiveni su s Mikrometeorološke postaje Maslenica, koju je nedavno postavio Geofizički opservatorij u blizini Maslenice. Međutim, kako je jedan od ciljeva karakterizirati jaku buru po tipu strujanja, za taj dio istraživanja bila su potrebna i visinska mjerenja vjetra. Najbliža meteorološka postaja koja provodi visinska mjerenja glavna je meteorološka postaja Zadar-Zemunik Državnog hidrometeorološkog zavoda (DHMZ). Stoga su u ovom radu korištena radiosondažna mjerenja s te lokacije. Ona se nalazi oko 20 km jugozapadno od Mikrometeorološke postaje Maslenica, točno u smjeru puhanja bure, pa je također pogodna za istraživanje vremenskih prilika koje vjetar donosi. Iz tog razloga preuzeli smo s te lokacije i podatke o dnevnoj količini oborine te temperaturi i relativnoj vlazi čiji trendovi se kasnije koriste za proučavanje vremenskih prilika. Za određivanje sinoptičkog tipa vjetra korištene su sinoptičke karte prizemnog polja tlaka. Sva analiza podataka provedena je koristeći programski jezik Python3.

2.1. Podaci s Mikrometeorološke postaje Maslenica

Maslenica je naselje smješteno na središnjem dijelu Jadranske obale, u Zadarskoj županiji. Nalazi se u podnožju Velebita, na spojnici Novigradskog mora s Velebitkim kanalom, pa je utjecaj orografije na režim strujanja prilično izražen na tom području. Mjerni toranj s dva ultrasonična anemometra smješten je između starog i novog Masleničkog mosta ($44^{\circ}13'52.9''$ N, $15^{\circ}32'00.7''$ E), na lokaciji prikazanoj na slikama 2.1a i



(a)



(b)

Slika 2.1. (a) Lokacija Mikrometeorološke postaje Maslenica. (b) Pobljža lokacija. (izvor: Google Maps)

2.1b. Ultrasonični anemometri nalaze se na visinama 5 i 10 m iznad tla, te frekvencijom uzorkovanja od 10 Hz mjere komponente brzine vjetra (horizontalne i vertikalnu) te soničnu temperaturu. Podaci s anemometara zapisani su u lijevom koordinatnom sustavu s apscisom u smjeru zapada i ordinatom u smjeru sjevera, pa su nakon transformacije u desni koordinatni sustav dobivene horizontalne komponente vjetra u u smjeru istok-zapad i v u smjeru sjever-jug koje su korištene u analizi. Sonična temperatura ne odgovara apsolutnoj temperaturi zraka jer se pri njenom izračunu ne uzimaju u obzir efekti vlage (Gill Instruments Ltd., 2010). Međutim, to ne predstavlja problem u istraživanju jer nas zanima samo relativni trend temperature tijekom pojedine epizode jakog vjetra. Svi podaci s anemometra usrednjeni u periodima od 10 minuta te je taj set podataka korišten u analizi.

2.2. Podaci s meteorološke postaje Zadar-Zemunik

Glavna meteorološka postaja Zadar-Zemunik provodi radiosondažna mjerenja svakodnevno u terminima 00 i 12 UTC. Podaci uključuju vertikalne profile vjetra, temperature zraka i temperature rosišta. Preuzeti su s web-stranice weather.uwyo.edu i prikazani u *skew-T* dijagramu korištenjem Python paketa MetPy koji je namjenjen čitanju, obradi i vizualizaciji meteoroloških podataka. Osim za procjenu dubine strujanja bure iz profila vjetra, za potrebe ovog rada korisne su i temperature zraka i rosišta. Na visinama gdje se one podudaraju došlo je do zasićenja zraka vodenom parom te se tamo mogu očekivati oblaci, a poznavanje te informacije pomaže u klasifikaciji vjetra po sinoptičkom tipu, jer poznajemo vremenske prilike koje se vežu uz pojedini tip. Uz dijagnostiku oblaka, u predočavanju vremenskih prilika također pomažu i informacije o količini oborine te o trendovima temperature i vlage tijekom epizode jakog vjetra. Stoga smo od DHMZ-a zatražili podatke o dnevnoj količini oborine te mjerenja temperature i relativne vlage na toj postaji. Ona se provode terminski, svakodnevno u 07, 14 i 21 UTC.

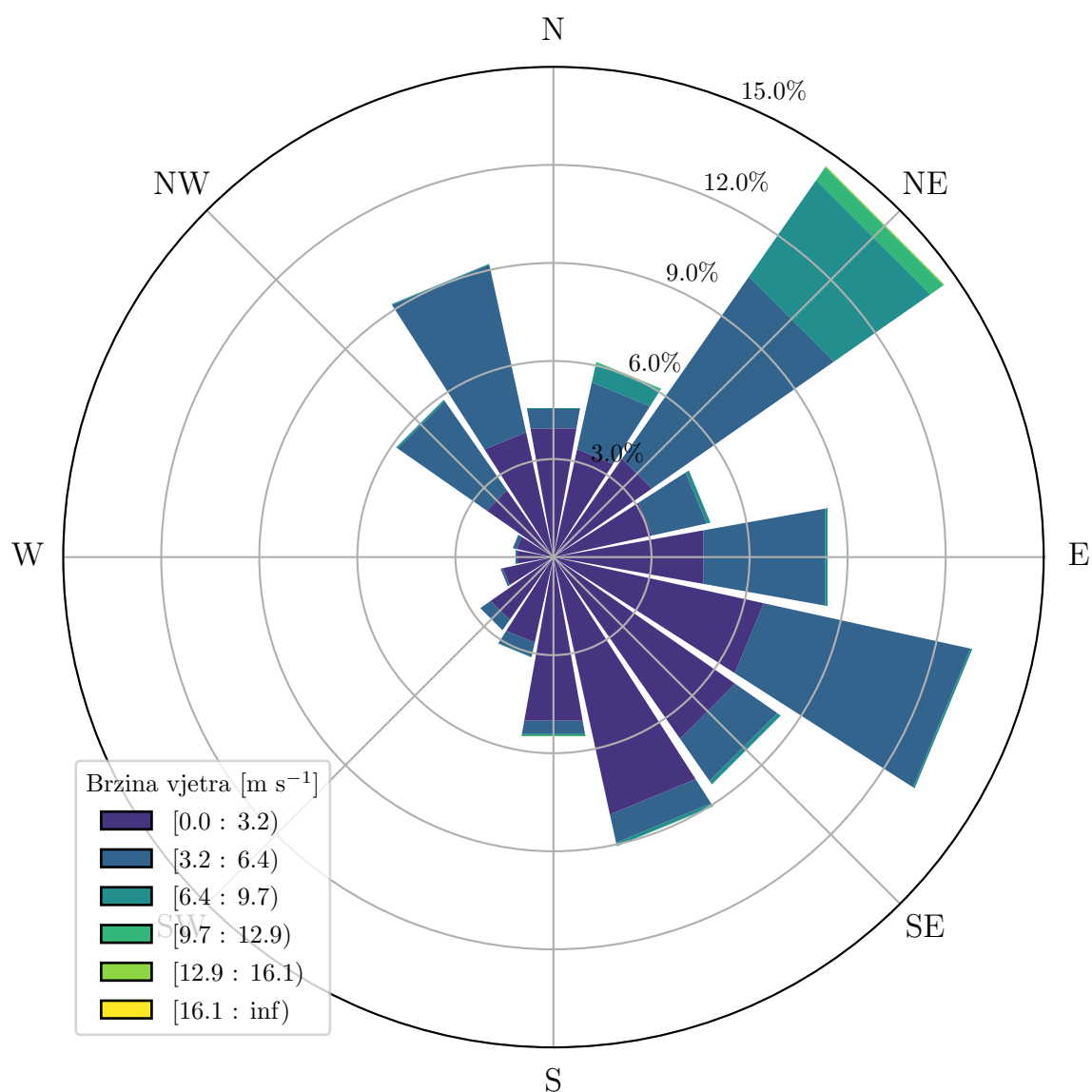
2.3. Sinoptičke karte

Za klasifikaciju vjetra po sinoptičkom tipu nužno je proučiti sinoptičke karte u terminima koji su obuhvaćeni trajanjem pojedine epizode jakog vjetra. U tu svrhu koristimo karte prikaza prizemnog tlaka zraka i fronti nad Europom koje postoje za četiri termina dnevno (u 00, 06, 12 i 18 UTC). Dostupne su na web-stranici wetter3.de koju vodi Njemačka meteorološka služba (njem. *Deutscher Wetterdienst* – DWD).

3. Opći pregled vjetra kod Maslenice

3.1. Ruže vjetra

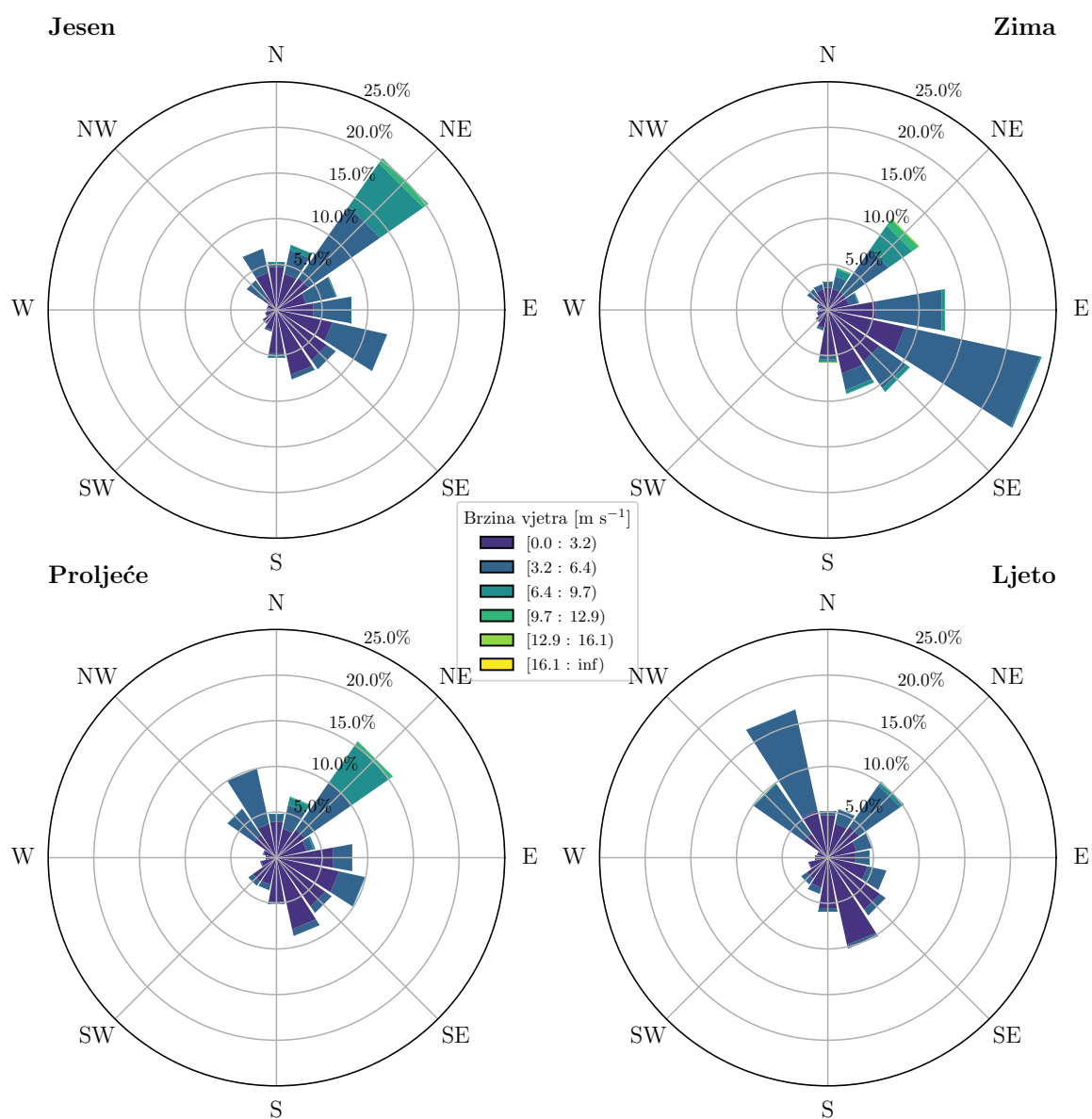
Ruža vjetra kod Maslenice u promatranom razdoblju (od listopada 2020. do studenog 2021. godine) prikazana je na slici 3.1. Vjetar iz smjerova bure zastupljeniji je i većih brzina od vjetra svih ostalih smjerova – najveća 10-minutna srednja brzina mu je 16.1 m s^{-1} – što ga čini uvjerljivo dominantnim vjetrom kod Maslenice. Jugo je također vrlo zastupljen, ali generalno manjih brzina od bure. Uz buru i jugo, izražen je vjetar smjerova sjever-sjeverozapad i jug-jugoistok s gotovo jednakim čestinama u



Slika 3.1. Ruža vjetra kod Maslenice u promatranom razdoblju, izračunata iz 10-minutnih srednjaka podataka. Brojevi na grafu označavaju relativne čestine pojedine kategorije.

ta dva smjera. Međutim, njegova brzina nije toliko izražena, a pojava nije pripisana nekoj posebnoj sinoptičkoj situaciji, već lokalnoj cirkulaciji o kojoj će biti više riječ u poglavlju 5.

Ruže vjetra za pojedine sezone prikazane su na slici 3.2. Izračunate su posebno odvajanjem podataka o vjetru za razdoblje zime (prosinac 2020., siječanj i veljača 2021.), proljeća (ožujak, travanj i svibanj 2021.), ljeta (lipanj, srpanj i kolovoz 2021.) i jeseni (rujan, listopad i studeni 2021.). Zimi uglavnom prevladava vjetar jugoistočnih smjerova te najjača bura u cijelom promatranom razdoblju. U proljeće i jesen smjerovi vjetra više su uniformno zastupljeni nego ljeti i zimi, s tim da jaka bura i dalje dominira. Ljeti jugo i bura gotovo uopće nisu izraženi u smislu čestina pojavljivanja.



Slika 3.2. Sezonske ruže vjetra kod Maslenice, izračunate iz 10-minutnih srednjaka podataka. Brojevi na grafu označavaju relativne čestine pojedine kategorije za svaku sezonu.

U to doba najviše je izražen sjever-sjeverozapadnjak i jug-jugoistočnjak, povezani s lokalnom cirkulacijom. Nazire se i godišnji hod te cirkulacije. Ona jača u toplom dijelu godine, a slabi i nestaje u najhladnijem dijelu godine. Može se primijetiti i godišnji hod bure; jača kroz jesen, najjača je zimi, a tijekom proljeća i ljeta ponovno slabi.

3.2. Tablice relativnih čestina

Dvije tablice relativnih čestina u nastavku pružaju detaljniji uvid u karakteristike jakog vjetra (brzine veće od 5 m s^{-1}) o kojem je većinom govor u radu. Tablica 3.1 prikazuje odnos brzine vjetra i smjera iz kojeg puše; tablica 3.2 odnos trajanja epizode vjetra i smjera iz kojeg vjetar tijekom te epizode uzastopce puše. S obzirom na to da se vjetar u obje tablice kategorizira po smjeru, u ovom dijelu rada za njihov izračun iznimno se koriste srednje satne vrijednosti brzine i smjera vjetra. Naime, algoritam povezuje uzastopne podatke o vjetru u epizodu ako je vjetar brzine veće od 5 m s^{-1} i uzastopce puše iz istog smjera. Iz tog razloga korištenje 10-minutnih srednjaka u izračunu imalo bi za posljedicu razlomljene epizode vjetra, budući da u gušće uzorkovanim podacima možemo očekivati da će vjetar češće na neko kratko vrijeme okrenuti smjer (ovdje jedan smjer obuhvaća raspon od 22.5° , jer je vjetar klasificiran u 16 smjerova), pa onda algoritam ne bi svrstao podatke pod istu epizodu. Iako je i uz korištenje satnih vrijednosti neizbježno razlamanje epizoda, saznanje o tome pomoći će u zaključivanju o stalnosti smjera bure i juga pri analizi njihovih epizoda.

Pri interpretaciji najbolje je promatrati obje tablice istovremeno. Kako se vidi iz tablice 3.1, sjeveroistočni, istočni, jugoistočni i sjeverozapadni vjetar najviše je zastupljen, što je u skladu s ružom vjetra na slici 3.1. Bura je najjača, a ujedno i najdugotrajnija kako je prikazano u tablici 3.2, za razliku od juga čije epizode ne traju toliko. Uzrok tomu su izraženije varijacije smjera tijekom pojedine epizode juga, o čemu će biti riječi u poglavlju 4. Istočnjak se u mjerenjima javlja kao zasebna epizoda jakog vjetra levanta, ali može značiti i okretanje vjetra s juga na buru pri prolasku baričkog sustava nad Jadranom (npr. Penzar i sur., 2001), čemu u prilog ide činjenica da se istočnjak javlja u kraćim epizodama. Ranije spomenuti sjeverozapadnjak očituje se u tablicama kao vjetar brzina do oko 6 m s^{-1} i trajanja do 7 sati te je posljedica lokalne cirkulacije. U sljedećim poglavljima bavimo se istraživanjem uzroka izraženog vjetra ovih smjerova, njegovim karakteristikama i vremenu koje donosi na područje Maslenice i Zadra.

Tablica 3.1. Relativne čestine vjetra (%) srednje satne brzine ovisno o smjeru vjetra, izračunate iz satnih srednjaka podataka.

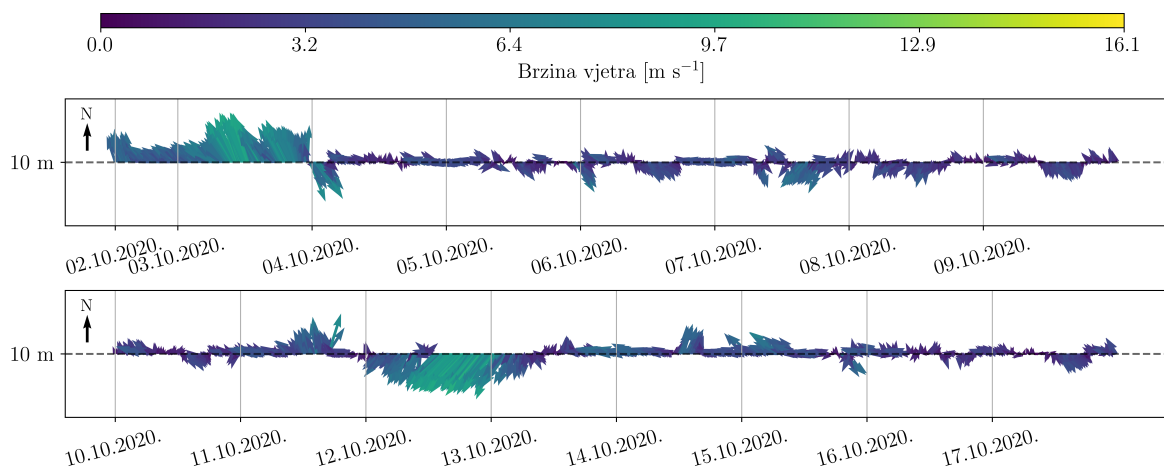
| brzina [m s^{-1}] | 5-6 | 6-7 | 7-8 | 8-9 | 9-10 | 10-15 | ≥ 15 | Ukupno |
|------------------------------|------|------|------|-----|------|-------|-----------|--------|
| N | 1 | 0.3 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0 | 0 | 3.8 |
| NNE | 10 | 7.7 | 7.1 | 5.4 | 3.4 | 4.2 | 0 | 11.2 |
| NE | 10.9 | 8.2 | 4.6 | 2.9 | 1.3 | 0.7 | 0 | 9.7 |
| ENE | 0.7 | 0.2 | 0.2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3.5 |
| E | 4.6 | 0.4 | 0.2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 14.9 |
| ESE | 3 | 1.1 | 0.1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11.9 |
| SE | 1 | 1.1 | 0.8 | 0.2 | 0 | 0 | 0 | 10.7 |
| SSE | 1.7 | 0.2 | 0.1 | 0.2 | 0.5 | 0 | 0 | 7.7 |
| S | 0.6 | 0.2 | 0.1 | 0 | 0.1 | 0 | 0 | 3.1 |
| SSW | 0.3 | 0.1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2.6 |
| SW | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.9 |
| WSW | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.8 |
| W | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.6 |
| WNW | 0.7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.7 |
| NW | 11.6 | 1.3 | 0.1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10.4 |
| NNW | 0.3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5.5 |
| Ukupno | 46.3 | 20.8 | 13.4 | 8.9 | 5.5 | 5 | 0 | 100 |

Tablica 3.2. Relativne čestine trajanja (%) srednje satne brzine vjetra $\geq 5 \text{ m s}^{-1}$ ovisno o smjeru vjetra, izračunate iz satnih srednjaka podataka.

| trajanje [h] | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | ≥ 16 | Ukupno |
|--------------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|----|-----|-----|----|-----------|--------|
| N | 2.9 | 0.4 | 0.4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3.7 |
| NNE | 13 | 4.3 | 3.3 | 2.1 | 0.8 | 0.8 | 1 | 0.4 | 0.4 | 0 | 0.4 | 0 | 0.2 | 0.2 | 0 | 1 | 28.1 |
| NE | 12.6 | 4.5 | 2.1 | 2.1 | 0.2 | 1 | 0.6 | 1 | 1 | 0 | 0.4 | 0 | 0 | 0.2 | 0 | 0 | 25.8 |
| ENE | 0.4 | 0.4 | 0 | 0 | 0 | 0.2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| E | 4.3 | 2.3 | 1 | 0 | 0 | 0.2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7.9 |
| ESE | 3.5 | 0.4 | 0.4 | 0.6 | 0 | 0.2 | 0.2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5.4 |
| SE | 1.9 | 0.4 | 1 | 0.2 | 0 | 0 | 0.2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3.7 |
| SSE | 3.3 | 0.4 | 0.2 | 0.2 | 0 | 0.2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4.3 |
| S | 1.4 | 0.4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.9 |
| SSW | 0.6 | 0.2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.8 |
| SW | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| WSW | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| W | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| WNW | 1 | 0 | 0.2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.2 |
| NW | 7.2 | 2.9 | 2.3 | 1.9 | 0.6 | 0.2 | 0.2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15.3 |
| NNW | 0.8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.8 |
| Ukupno | 53.1 | 16.7 | 11 | 7 | 1.7 | 2.9 | 2.3 | 1.4 | 1.4 | 0 | 0.8 | 0 | 0.2 | 0.4 | 0 | 1 | 100 |

4. Epizode jakog vjetra

Kao što se moglo zaključiti iz tablice relativnih čestina 3.2, kod Maslenice su zabilježene epizode jakog vjetra različitog trajanja. U ovom poglavlju istražujemo epizode jakog vjetra trajanja od barem 10 h, a da zadovoljavaju kriterij horizontalne brzine $v_H \geq 5 \text{ m s}^{-1}$. Algoritmu korištenom za ovaj dio rada uzastopan isti smjer puhanja nije kriterij za izdvajanje epizode, pa je svaka epizoda nakon izdvajanja klasificirana po smjeru iz svog prikaza na vektor dijagramu. Vektor dijagrami cijelog analiziranog razdoblja mogu se naći u dodatku A, a jedan primjer prikazan je na slici 4.1. Na njemu je prikazan horizontalni vjetar na visini od 10 m u 10-minutnim srednjacima, tijekom prva dva tjedna listopada 2020. godine. Duljina vektora i boja označavaju brzinu u jedinicama m s^{-1} , a smjer sjevera naznačen je u gornjem lijevom uglu.



Slika 4.1. Vektor dijagram 10-minutnih srednjaka brzine i smjera vjetra na 10 m visine tijekom prva dva tjedna listopada 2020. godine. Duljina i boja vektora označavaju brzinu vjetra u jedinicama m s^{-1} .

Algoritam je izdvojio ukupno 25 epizoda od kojih su dvije epizode juga, po jedna epizoda oštrog i levanta, i sve ostale epizode bure, kao što je prikazano u tablici 4.1. Na vektor dijagramu sa slike 4.1 mogu se prepoznati dvije od izdvojenih epizoda: jugo s početkom 3. 10. i bura s početkom 12. 10. 2020. godine.

Tablica 4.1. Broj izdvojenih epizoda jakog vjetra (brzine $v_H \geq 5 \text{ m s}^{-1}$ i trajanja $\geq 10 \text{ h}$) po pojedinom vjetru.

| vjetar | broj epizoda |
|---------------|--------------|
| bura | 21 |
| jugo | 2 |
| oštro | 1 |
| levant | 1 |
| Ukupno | 25 |

U nastavku predmet promatranja su epizode bure i juga, s obzirom da su to glavni i dominantni vjetrovi na području Maslenice. Klasificirat ćemo ih po sinoptičkom tipu i analizirati po jedan reprezentativan primjer za svaki tip. Zatim ćemo za svaku epizodu promotriti sinoptičku situaciju te promjene u temperaturi i relativnoj vlazi koju taj vjetar donosi, kao i provjeriti podatke o dnevnoj količini oborine tijekom trajanja epizode. Diskutirat ćemo i radiosondažna mjerenja, a u slučaju bure odrediti i tip strujanja.

4.1. Bura

Izdvojene epizode bure klasificirane su po sinoptičkom tipu i tipu strujanja te prikazane u tablici 4.2. Pronađeno je 11 anticiklonalnih i devet ciklonalnih bura, te jedna frontalna. Gotovo sve su plitke, osim dvije ciklonalne i dvije anticiklonalne bure. U sljedećim potpoglavljima analizirat ćemo po jedan reprezentativni slučaj za svaki sinoptički tip bure.

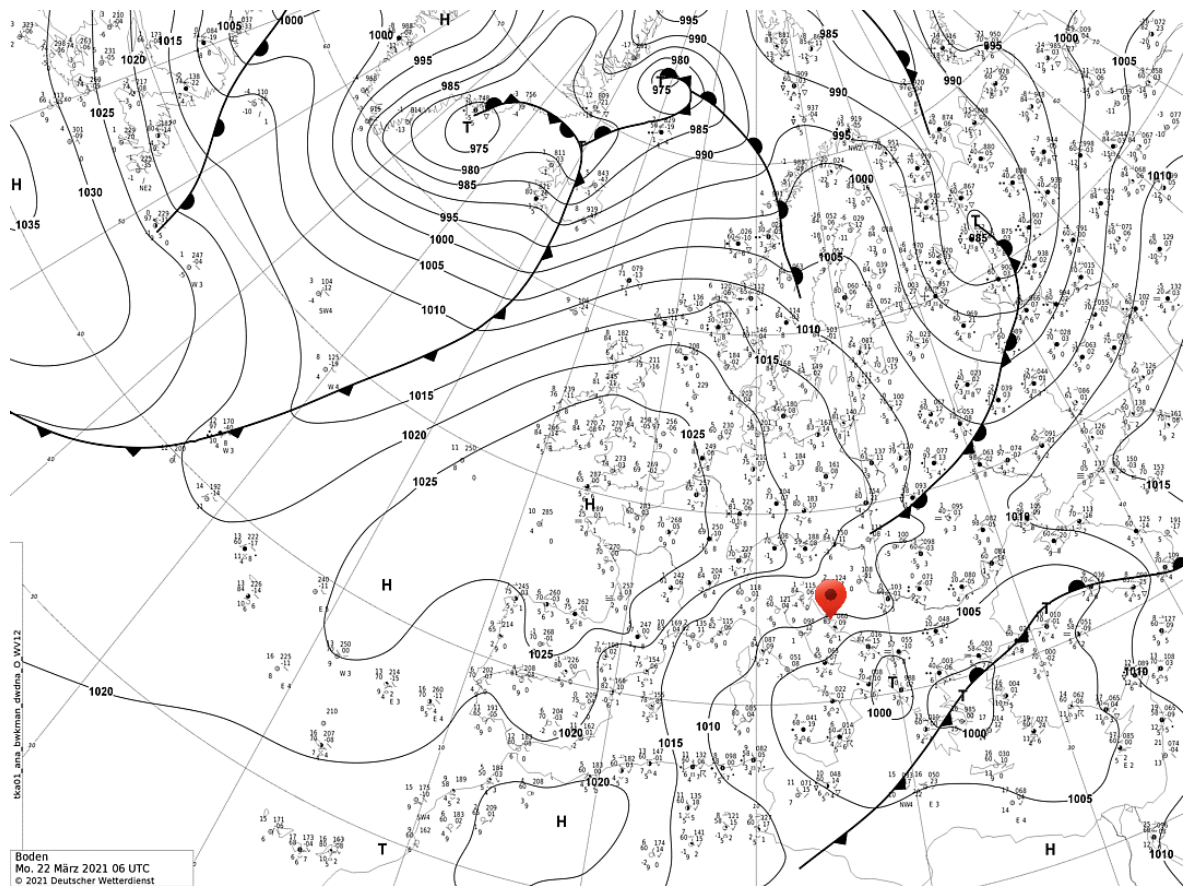
Tablica 4.2. Klasifikacija epizoda jake bure po sinoptičkom tip i tipu strujanja.

| <i>BURA</i> | plitka | duboka | Ukupno |
|-------------|--------|--------|--------|
| C | 7 | 2 | 9 |
| AC | 9 | 2 | 11 |
| F | 1 | 0 | 1 |
| Ukupno | 17 | 4 | 21 |

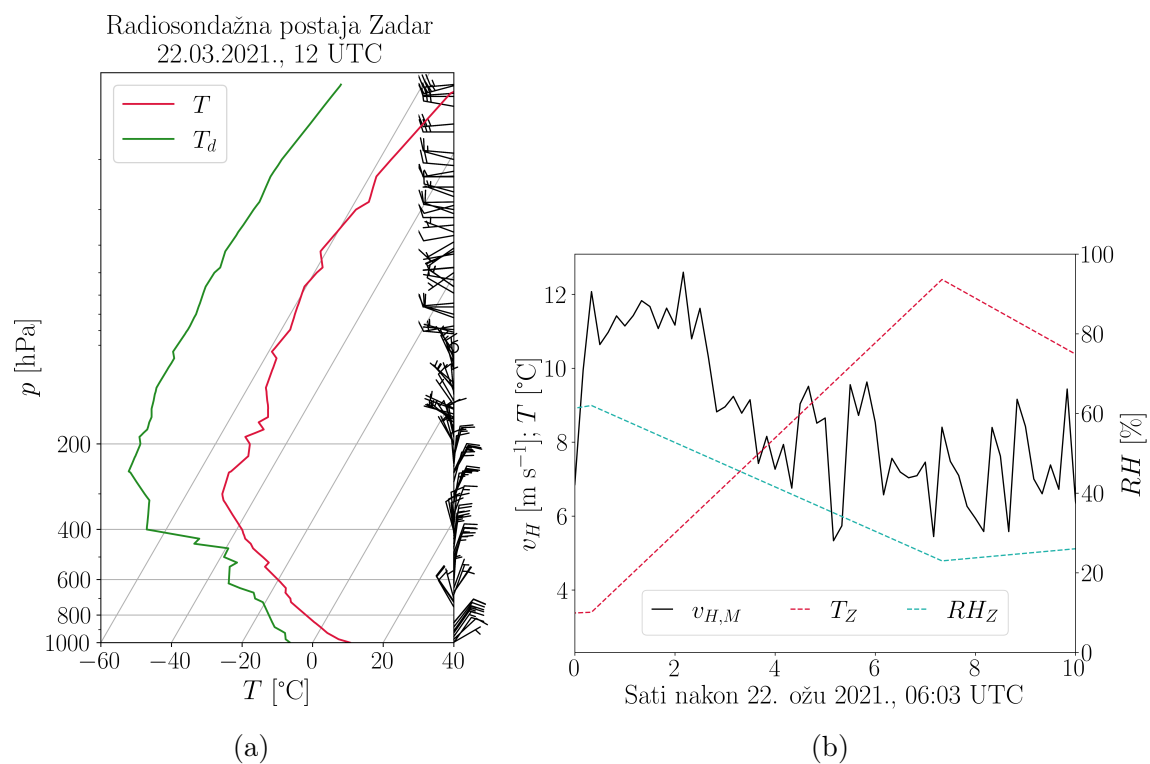
4.1.1. Anticiklonalna bura

Ova epizoda jake bure trajanja od 10.2 h započela je naglo 22. ožujka 2022. u 06:03 UTC. Na slici 4.2 prikazana je sinoptička situacija u terminu 22. ožujka 2021. u 06 UTC za vrijeme najjačeg puhanja bure. Ova epizoda uzrokovana je jakom anticiklonom koja se premještala preko Velike Britanije, te dosežući sve do Jadrana generirala sjeveroistočno strujanje i na mjernoj lokaciji. Jugoistočno od Jadrana u Egejskom moru nalazila se ciklona koja je također podupirala strujanje iz tog smjera, što je dovelo do velikih brzina, i preko 12 m s^{-1} . Prema svemu, ovu buru možemo svrstati u anticiklonalni tip. Isti dan u 12 UTC na slici 4.3a prikazani su visinski profili vjetra te temperature zraka i rosišta u Zadru. Vjetar iz smjera sjeveroistoka doseže do gotovo 200 hPa, dok na većim visinama okreće na zapad. Prema tome, govorimo o slučaju duboke anticiklonalne bure. Iz temperaturnih profila, odnosno činjenice da temperatura nigdje ne doseže temperaturu rosišta, može se zaključiti da vjerojatno nije bilo oblaka. Kako je vidljivo na slici 4.3b, za vrijeme puhanja ovog vjetra vrlo promjenjive brzine relativna vlaga opada čak do ispod 25 %, a temperatura raste. Iz tih trendova, kao i činjenice da na postaji kod Zadra nije registrirana oborina, može se zaključiti da je

temperatura ostvarila dnevni hod moduliran utjecajem puhanja jakog vjetera. Dakle, ova anticiklonalna bura donjela je nad Zadrom izrazito suho, vedro vrijeme bez oborine.



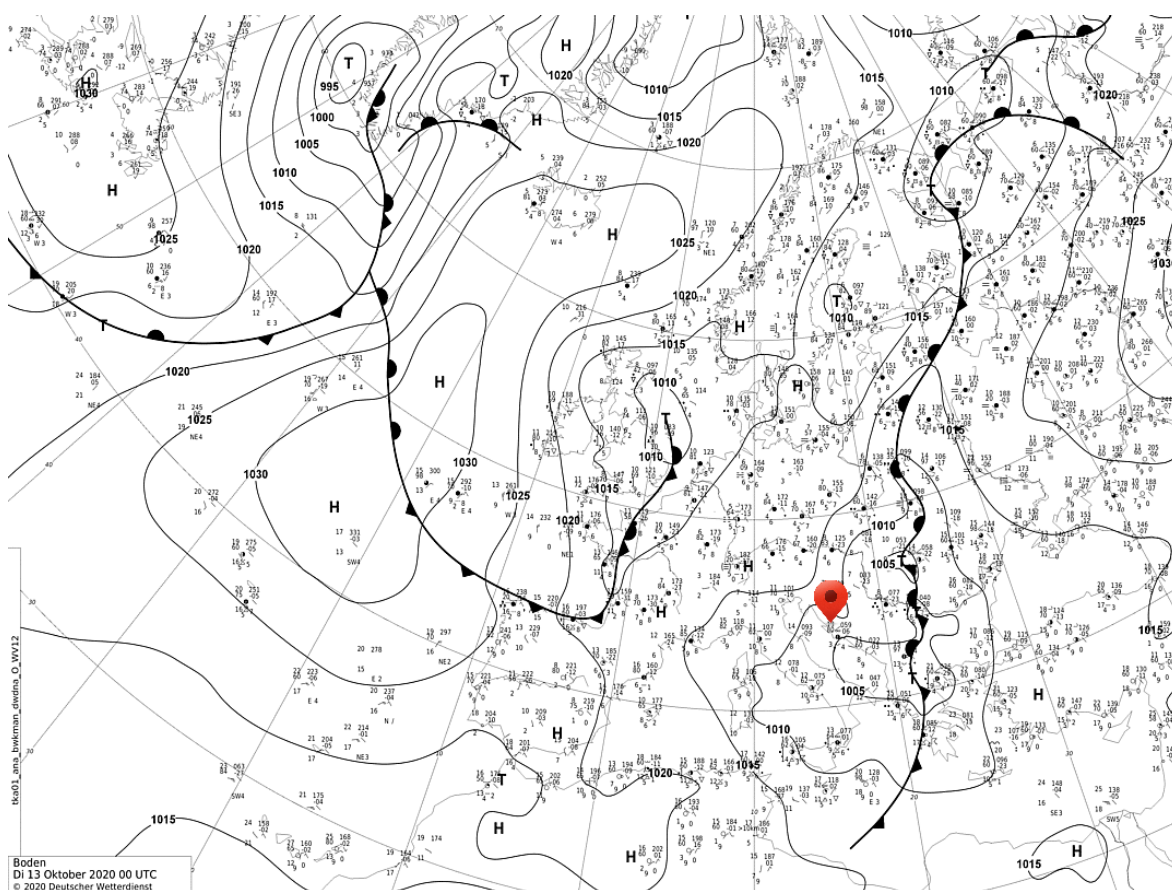
Slika 4.2. Prizemna sinoptička karta u terminu 22. ožujka 2021. u 06 UTC, za vrijeme najjače anticiklonalne bure (izvor: wetter3.de). Označena je lokacija Mikrometeorološke postaje Maslenica.



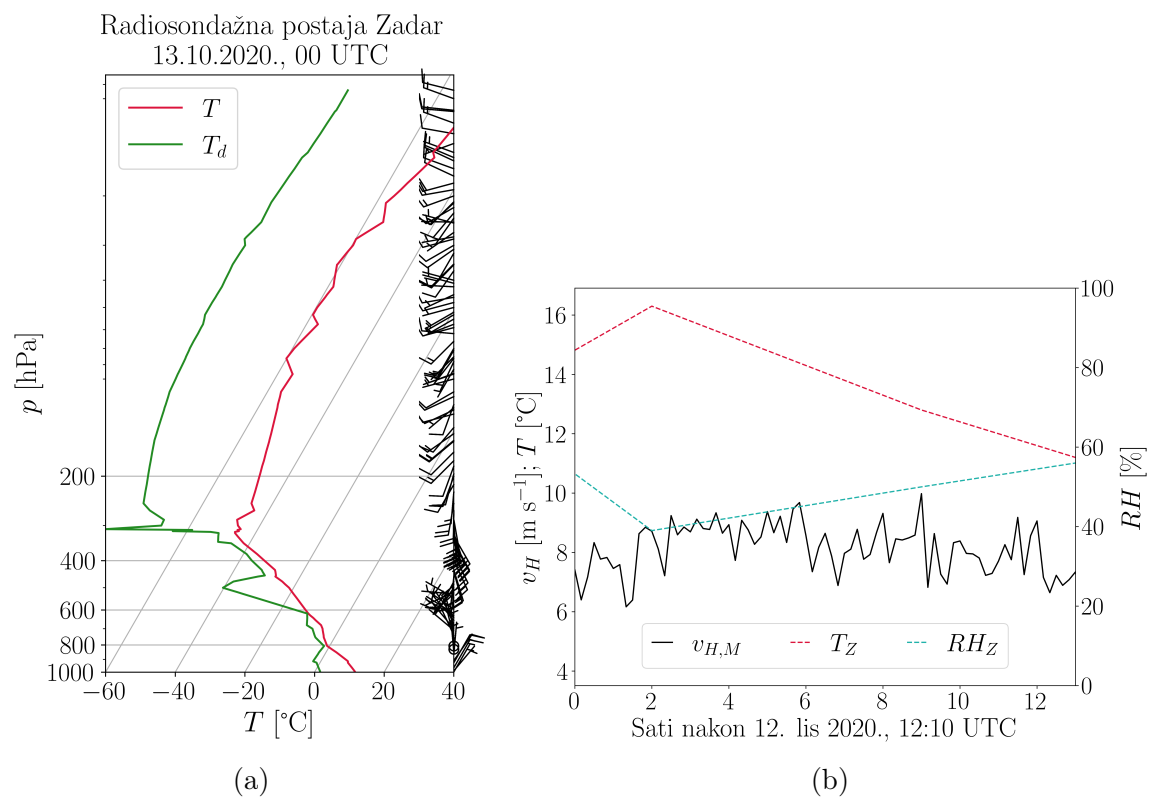
Slika 4.3. Epizoda jake anticiklonalne bure s početkom 22. ožujka 2021. u 06:03 UTC. (a) Radiosondažno mjerenje vjetra i temperature u terminu 22. ožujka 2021. u 12 UTC. (b) Horizontalna brzina vjetra kod Maslenice te temperatura i relativna vlažnost kod Zadra za vrijeme trajanja epizode.

4.1.2. Ciklonalna bura

Naredni slučaj bure klasičan je primjer ciklonalnog tipa bure. Uzrokovan je ciklonom nastalom u Genovskom zaljevu koja se preko Jadrana premještala prema sjeveroistoku. Jaka bura započela je 12. listopada 2020. u 12:10 UTC, a za vrijeme najjačeg puhanja u terminu 13. listopada 2020. u 00 UTC može se vidjeti sinoptička situacija na slici 4.4 i visinski profili u Zadru na slici 4.5a. Radi se o plitkoj buri, budući da puše samo u plitkom troposferskom sloju do otprilike 900 hPa. Temperaturni profili ukazuju na mogućnost pojave srednjih i niskih oblaka u to vrijeme, što potvrđuje i podatak o dnevnoj količini oborine u Zadru 12. listopada koji iznosi 7.8 mm. Trend relativne vlažnosti na slici 4.3b prikazuje gotovo konstantnu vlagu tijekom epizode, višu nego za vrijeme anticiklonalne bure. Također, brzina nije toliko skokovita kao u slučaju duboke anticiklonalne bure iz prošlog primjera. Temperatura s vremenom opada, što je kombinacija utjecaja oborine, doba dana i puhanja jakog vjetera. Iz svega se može pretpostaviti da je ova jaka bura u Zadru donijela oblačno i kišno vrijeme.



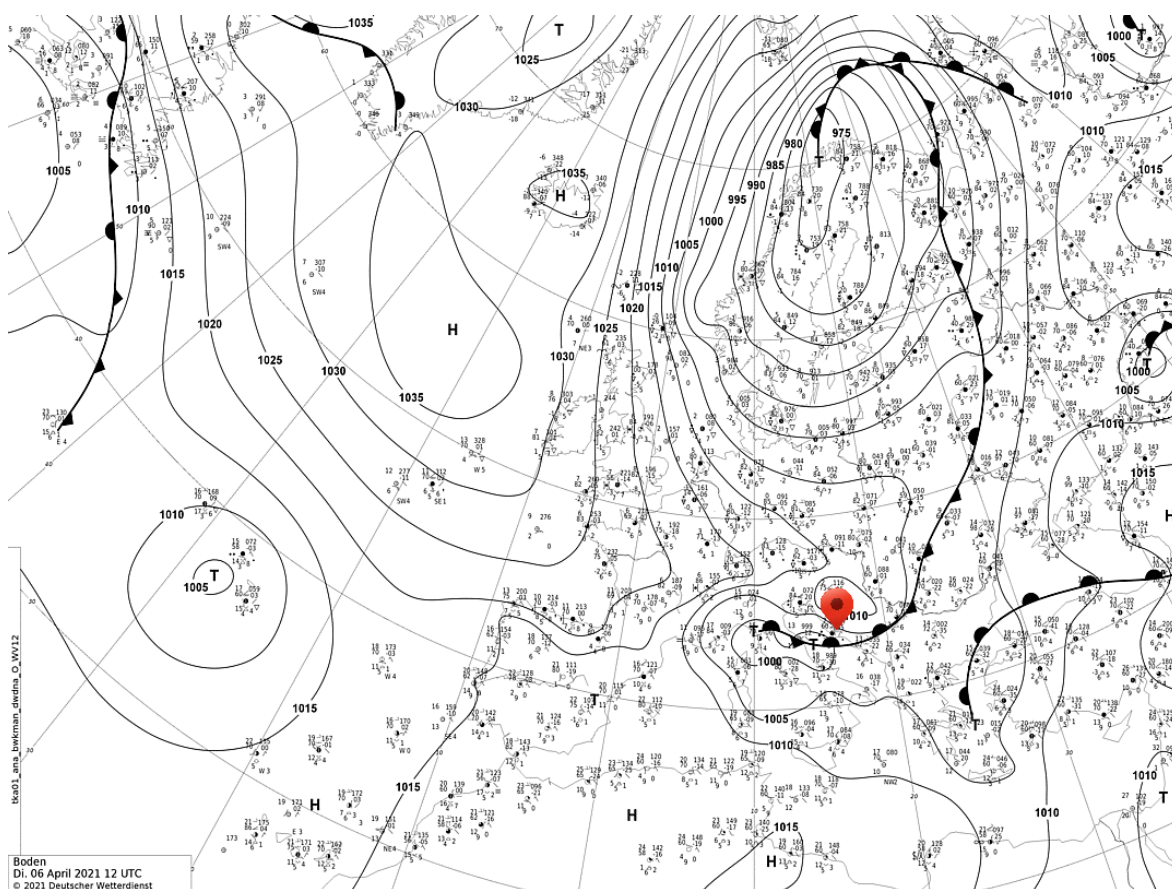
Slika 4.4. Prizemna sinoptička karta u terminu 13. listopada 2020. u 00 UTC, za vrijeme najjače ciklonalne bure (izvor: wetter3.de). Označena je lokacija Mikrometeorološke postaje Maslenica.



Slika 4.5. Epizoda jake ciklonalne bure s početkom 12. listopada 2020. u 12:10 UTC. (a) Radiosondažno mjerenje vjetra i temperature u terminu 13. listopada 2020. u 00 UTC. (b) Horizontalna brzina vjetra kod Maslenice te temperatura i relativna vlažnost kod Zadra za vrijeme trajanja epizode.

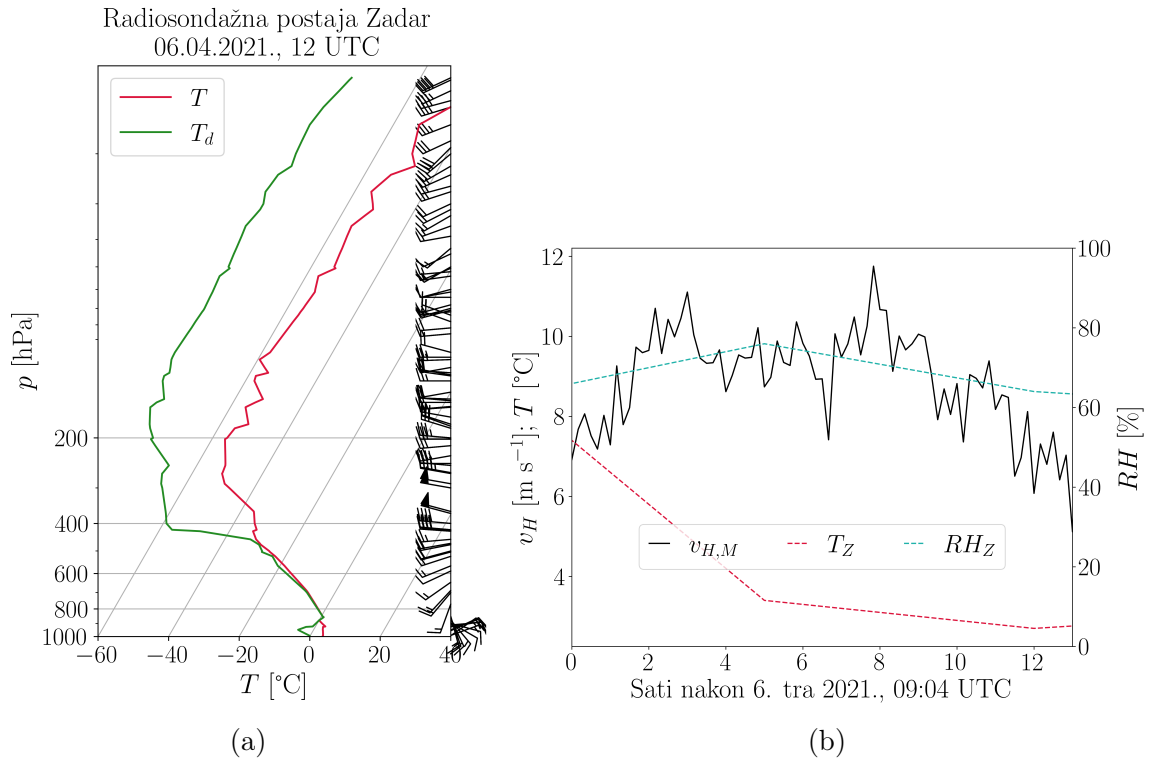
4.1.3. Frontalna bura

Karakterističan slučaj bure povezane s prolaskom prizemne fronte nad Jadranom dogodio se 6. travnja 2021. s početkom u 09:04 UTC i trajanjem oko 13 h. Ova bura uzrokovana je međudjelovanjem fronti ciklone nad Italijom i ciklone nad Skandinavskim poluotokom. Nagli prelazak fronte preko Jadrana iz smjera sjeveroistoka uzrokovao je prodor zraka s kopna, a fronta se može primijetiti na prizemnoj sinoptičkoj karti u terminu 12 UTC tog dana na slici 4.6. U tom terminu nad Zadrom iz snimljene radiosondaže sa slike 4.7a može se zaključiti da je situacija bila pogodna za formaciju sloja oblaka. Oblaci su vjerojatno i nastali, s obzirom na velike gradijente meteoroloških elemenata koji se događaju u području fronti. Međutim, iako su se možda formirali, ti oblaci nisu bili kišonosni budući da tijekom epizode kod Zadra nije registrirana oborina u tom periodu. Po profilu vjetra vidimo da se radi o plitkoj buri, jer već na visini pri 900 hPa vjetar okreće smjer. To je i očekivano za kratkotrajne bure frontalnog tipa. Iznenadni karakter ovog tipa bure dobro je prikazan i na slici 4.7b. Horizontalna brzina bure, koja na početku naglo poraste, nekoliko sati drži oko 10 m s^{-1} i zatim vrlo jasno opada s udaljavanjem fronte od mjerne lokacije. Relativna vlažnost cijelo vrijeme



Slika 4.6. Prizemna sinoptička karta u terminu 6. travnja 2021. u 12 UTC, za vrijeme najjače frontalne bure (izvor: wetter3.de). Označena je lokacija Mikrometeorološke postaje Maslenica.

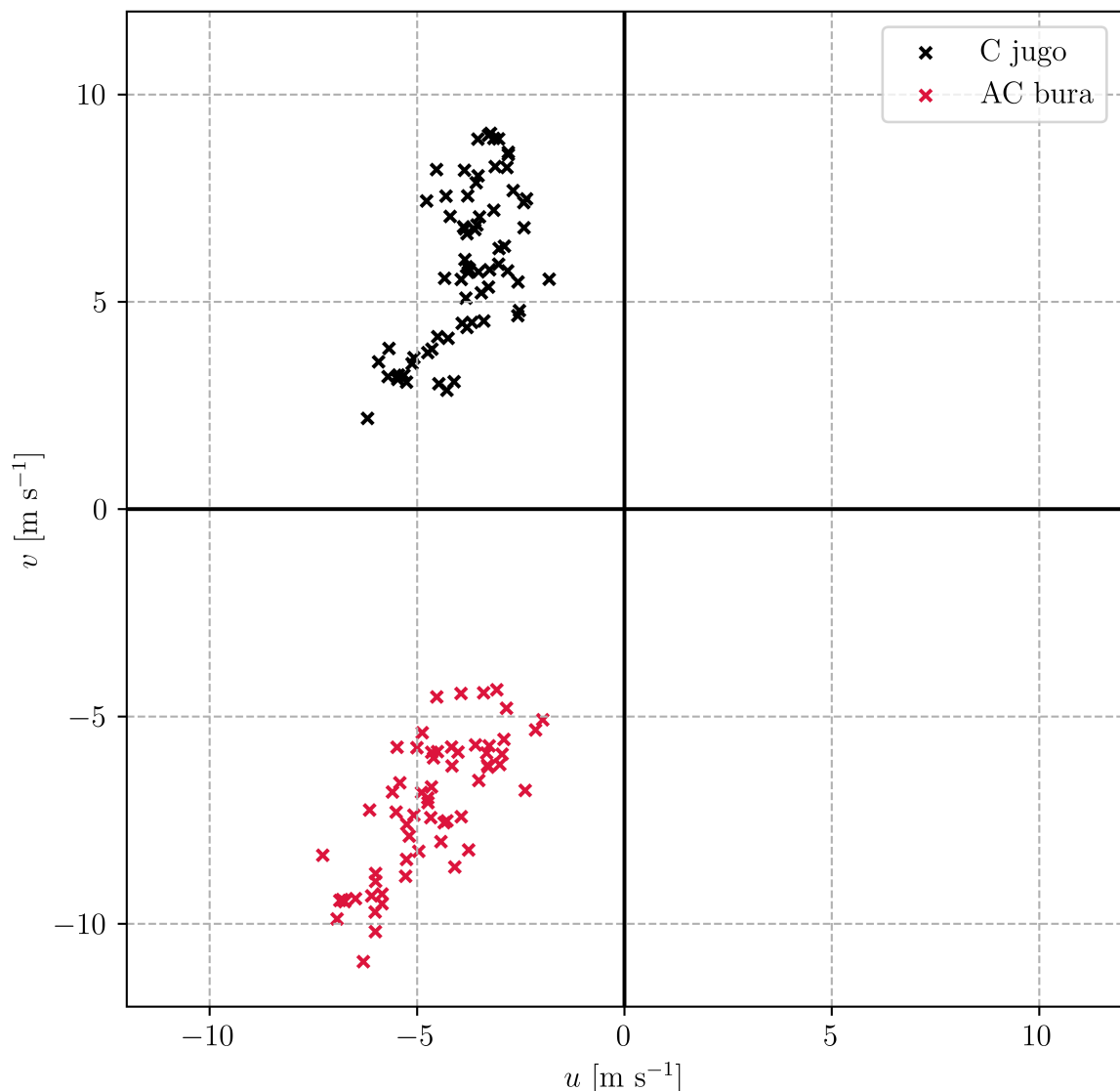
gotovo je konstantna, a temperatura koja je naglo opala s početkom bure sugerira da se radilo o prodoru hladnog zraka, odnosno o nailasku hladne fronte. Iz svega se može pretpostaviti da je ova bura naglo donijela hladno i oblačno vrijeme bez oborine na područje Zadra.



Slika 4.7. Epizoda jake frontalne bure s početkom 6. travnja 2021. u 09:04 UTC. (a) Radiosondažno mjerenje vjetra i temperature u terminu 6. travnja 2021. u 12 UTC. (b) Horizontalna brzina vjetra kod Maslenice te temperatura i relativna vlažnost kod Zadra za vrijeme trajanja epizode.

4.2. Jugo

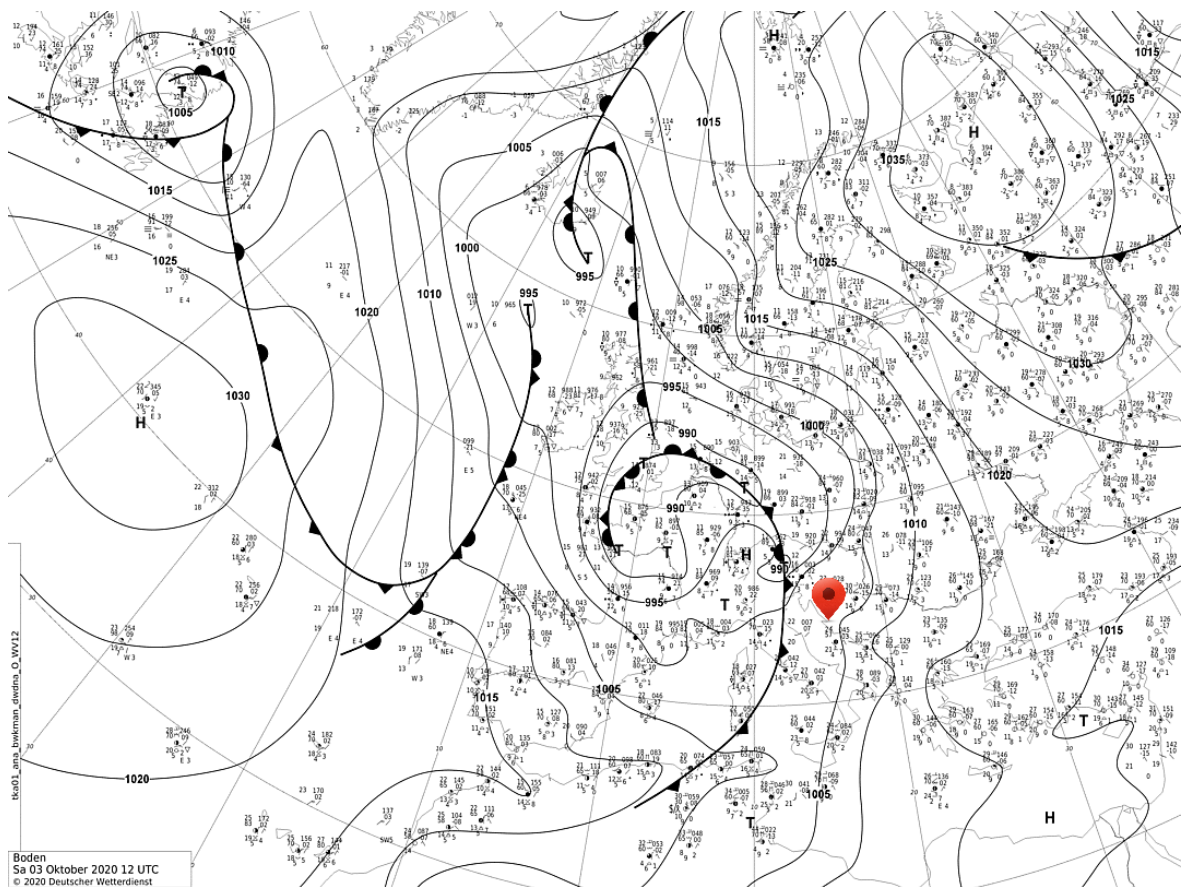
Kao što je bilo naglašeno u poglavlju 3., u tijeku istraživanja primijećeno je da vektor vjetra ima veću varijabilnost smjera tijekom pojedine epizode juga u usporedbi s burom, koja ima konzistentniji smjer. Na slici 4.8 intuitivno su prikazani smjerovi puhanja ta dva vjetra tijekom epizode u svrhu dokaza prethodne tvrdnje. Horizontalne komponente svakog 10-minutnog srednjaka vjetra, odnosno vrhovi vektora vjetra koji polaze iz ishodišta koordinatnog sustava, prikazani su točkom. Stoga bi prikaz idealiziranog vjetra koji stalno puše iz istog smjera izgledao kao skup točaka na pravcu koji prolazi centrom koordinatnog sustava, pri čemu varira jedino udaljenost točaka od ishodišta jer se brzina vjetra mijenja. U slučaju bure, kako se vidi sa slike, te točke



Slika 4.8. Točke označavaju vrhove 10-minutnih vektorskih srednjaka vjetra koji polaze iz ishodišta koordinatnog sustava, tijekom epizode bure s početkom 22. ožujka 2021. i epizode juga s početkom 3. listopada 2020.

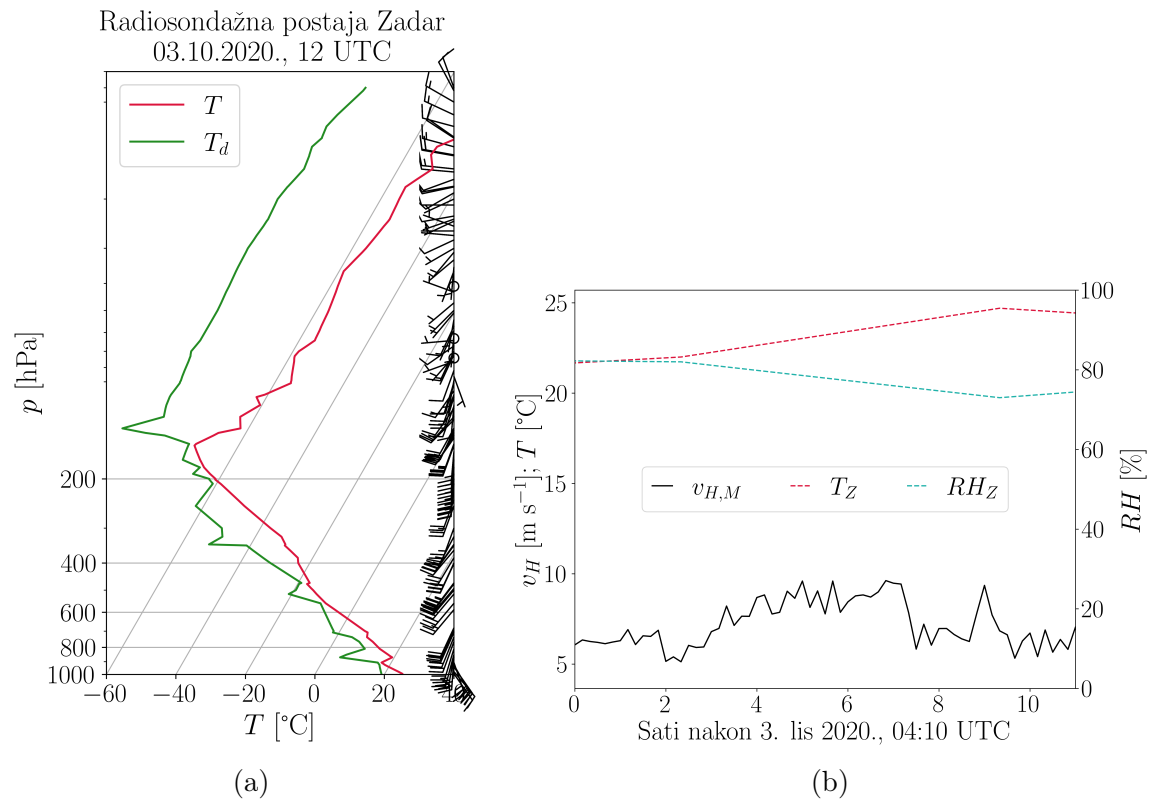
više odgovaraju pravcu što sugerira na stalniji smjer. Tijekom epizode bure sa slike raspon smjerova vektora brzine iznosi 25.5° . S druge strane, smjerovi juga razasuti su po drugom kvadrantu i ne prate nikakav zamišljeni pravac (u ovoj epizodi juga raspon smjera je čak 53.0°). Izračunato za sve izdvojene epizode, u prosjeku smjer vektora bure varira unutar 29.7° , a smjer vektora juga unutar 49.5° , pa sve zajedno još jednom potvrđuje raniju tvrdnju da tijekom epizode smjer juga više varira. Prikazi preostalih epizoda bure i juga u skladu su s ovdje opisanima, pa nisu prikazani u radu.

U analiziranom razdoblju primijećene su samo dvije epizode jakog juga, oba ciklonalnog tipa, stoga u ovom potpoglavlju analiziramo jedan takav slučaj. Odabrana epizoda zadovoljavala je gore spomenute kriterije jakog vjetera tek 11 sati, s početkom 3. listopada 2020. u 4:10 UTC. Međutim, slab jugo zabilježen je i dan ranije kad je ciklona koja ga je uzrokovala nastala nad Biskajskim zaljevom. Nakon što je ojačala, pomaknula se sjeveroistočno prema Britanskom otočju i u svom širokom toplom sektoru na području mjerenja još više pojačala jugo. Tijekom razdoblja najjačeg puhanja juga istog dana u terminu 12 UTC prikazana je sinoptička situacija na slici 4.9. Radiosondažna mjerenja u Zadru, slika 4.10a, u istom terminu ukazuju na to da je jugo puhao samo u plitkom troposferskom sloju, a iz profila temperature zraka i rosišta



Slika 4.9. Prizemna sinoptička karta u terminu 3. listopada 2020. u 12 UTC, za vrijeme najjačeg ciklonalnog juga (izvor: wetter3.de). Označena je lokacija Mikrometeorološke postaje Maslenica.

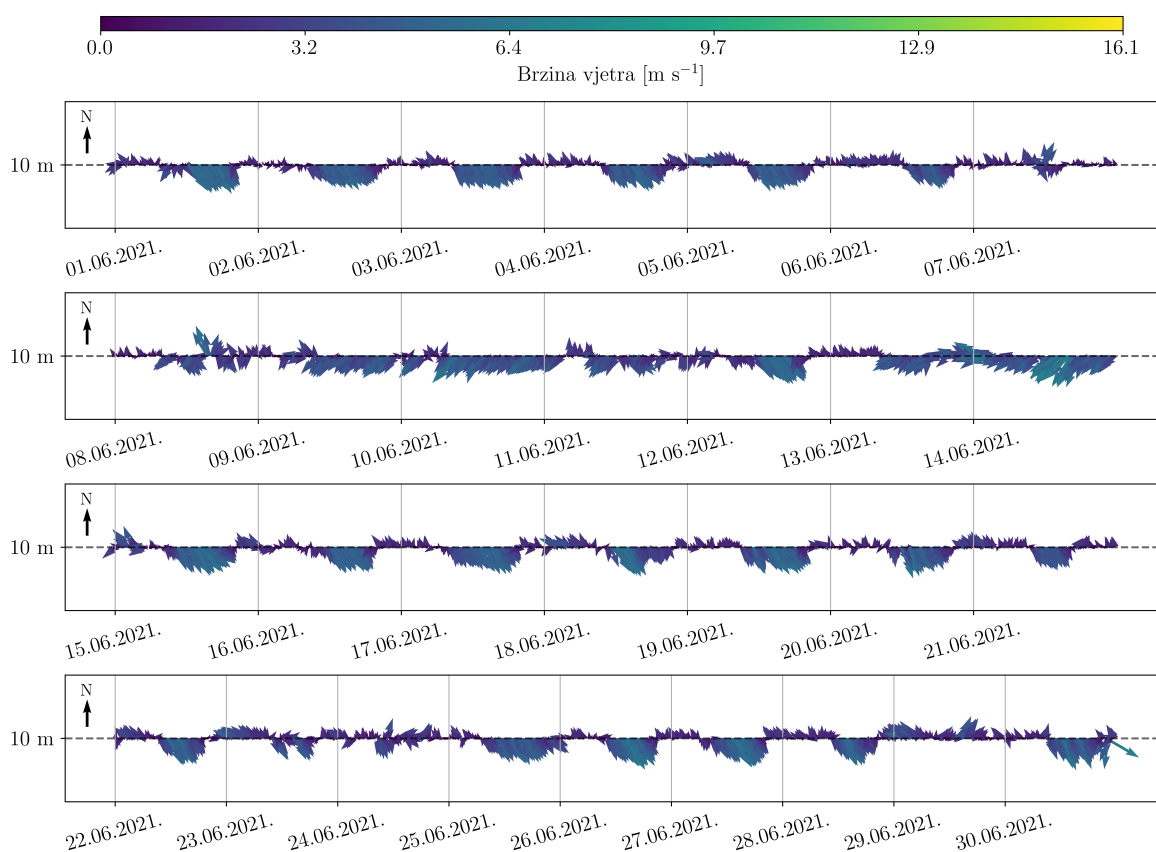
prepoznajemo mogućnost da su se tada pojavili oblaci. Kako je količina oborine za taj dan u Zadru iznosila 7.7 mm, oblaci su se sigurno formirali. Relativna vlažnost u Zadru bila je vrlo visoka i poput temperature gotovo konstantna cijelo vrijeme, što se jasno vidi na slici 4.10b i podupire zaključak da se radilo o ciklonalnom jugu. Dakle, ova epizoda juga u Zadar je donijela kišno i vrlo vlažno, najvjerojatnije neugodno i sparno vrijeme.



Slika 4.10. Epizoda jakog ciklonalnog juga s početkom 3. listopada 2020. u 04:10 UTC. (a) Radiosondažno mjerenje vjetra i temperature u terminu 3. listopada 2020. u 12 UTC. (b) Horizontalna brzina vjetra kod Maslenice te temperatura i relativna vlažnost kod Zadra za vrijeme trajanja epizode.

5. Cirkulacija duž Velebitskog kanala

Tijekom ovog istraživanja primijećen je dnevni sjeverozapadni vjetar trajanja duljeg od 6 h. On je najizraženiji u ljetnim mjesecima, a zimi je vrlo slabo izražen, kako je bilo diskutirano u poglavlju 3. na prikazima sezonskih ruža vjetra 3.2. Taj vjetar lako se može prepoznati na vektorskom dijagramu za lipanj 2021. na slici 5.1. Vidi se kako



Slika 5.1. Vektor dijagram 10-minutnih srednjaka brzine i smjera vjetra na 10 m visine tijekom lipnja 2021. godine. Duljina i boja vektora označavaju brzinu vjetra u jedinicama m s^{-1} .

je njegovo pojavljivanje danju i jenjavanje noću gotovo svakodnevno, za vrijeme mirne sinoptičke situacije kad neki jaki vjetar poput bure ili juga ne nadjača njegov utjecaj. Iz svega, prirodno bi bilo zaključiti da je to dnevni vjetar obalne cirkulacije, zmorac. Međutim, kako se može zaključiti prema orijentaciji obale sa slike 2.1, to strujanje smjerom ne odgovara zmorcu kojeg bismo očekivali s obzirom na konfiguraciju obale u njenoj blizini.

Kako se pojava ovog vjetra ne može objasniti jednostavnim modelom obalne cirkulacije, u ovom radu postavljamo sljedeću hipotezu: to strujanje dio je termalne cirkulacije duž Velebitskog kanala. Cirkulacija u pitanju mogla bi se najbolje objasniti kombinacijom obalne cirkulacije i cirkulacije obronka, odnosno doline. Tu pretpostavljenu dolinu

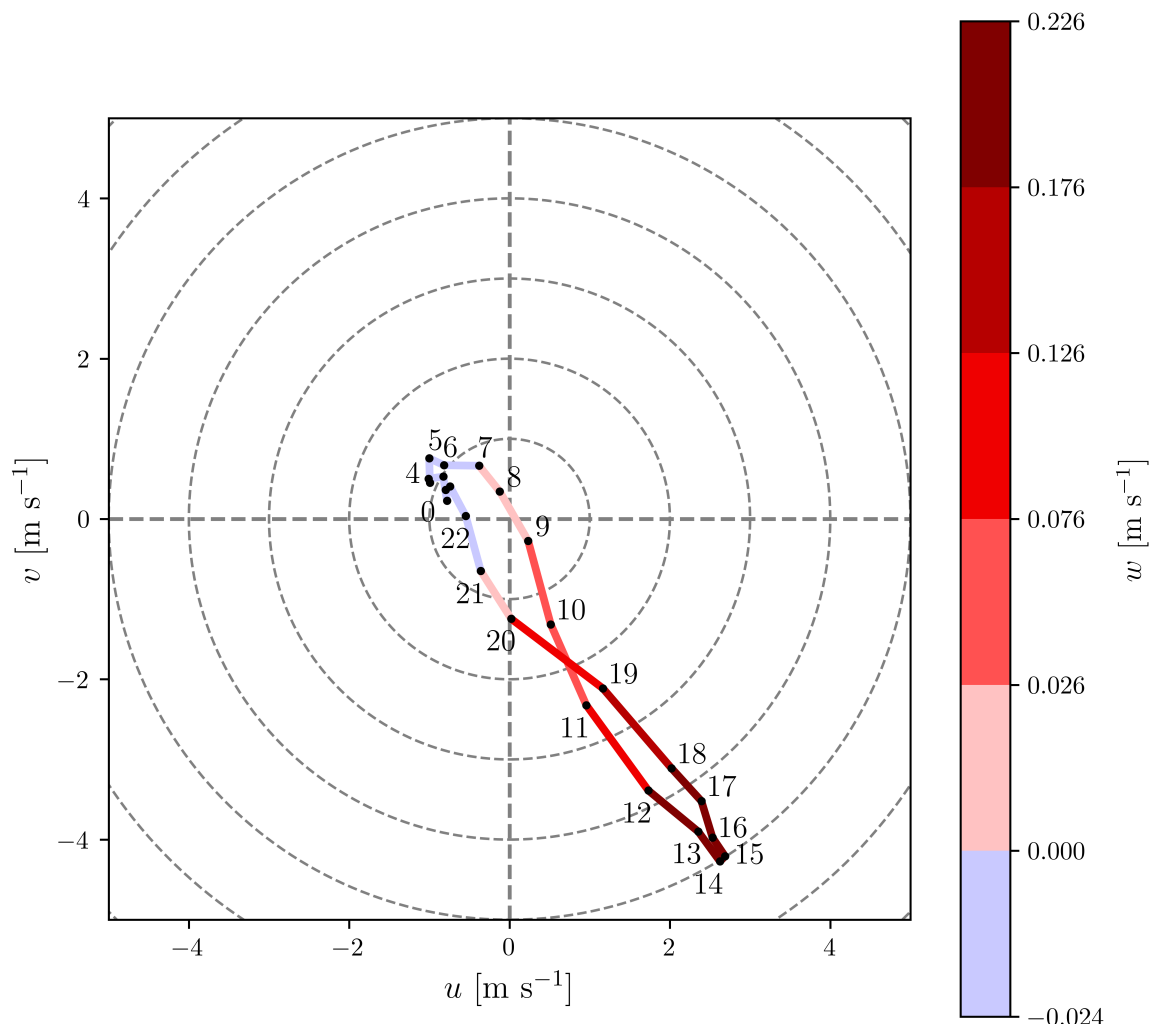
koja se proteže u smjeru sjeverozapad-jugoistok između sebe zatvaraju otoci i Velebit. Na sjeverozapadnom rubu je otvorena, a na jugoistočnom omeđena kopnom gdje je smještena i Mikrometeorološka postaja Maslenica – na samom vrhu doline. Dnevna situacija shematski je prikazana na slici 5.2. Tada se otoci, priobalni obronci Velebita i jugoistočni dio kopna naglo zagriju, pa se javlja strujanje uz Velebit, prema središtima otoka i prema kopnu. Zbog naglog otjecanja zraka iz Velebitskog kanala događa se prodor zraka s otvorene sjeverozapadne strane Velebitskog kanala, pa kroz njega puše sjeverozapadni dolinski vjetar. Zanimljivo je da noćna cirkulacija ne dovodi do tako izraženog vjetera jer ju pogoni upravo superpozicija različitih termalnih cirkulacija. Danju se zrak odvodi iz tjesnaca kombinacijom međusobno usporedivih utjecaja



Slika 5.2. Dnevni slučaj pretpostavljene cirkulacije duž Velebitskog kanala. Crvene strelice predstavljaju strujanje zraka pri tlu. Označena je lokacija Mikrometeorološke postaje Maslenica.

cirkulacije obronka uz Velebit i obalne cirkulacije prema kopnu i otocima. Zbog toga se tijekom dana puno zraka treba nadomjestiti sa sjeverozapada. Noću dosta zraka silazi s Velebita, ali zbog slabije noćne obalne cirkulacije ne pritječe toliko zraka iz smjera kopna i otoka. Stoga tijekom noći silazni zrak s Velebita nije dovoljan da naglo prema sjeverozapadu izgura nakupljeni zrak u tjesnacu, pa zrak ostaje u dolini. U njenom centru javlja se slabo uzlazno gibanje, a nad okolnim kopnom i otocima slabo silazno. Razne studije čiji je predmet istraživanja cirkulacija doline došle su do rezultata analognih opisanima, poput Giovannini i sur. (2017) koje se bavi strujanjem u dolini Adige u istočnim Alpama.

U svrhu podupiranja hipoteze o ovakvoj cirkulaciji izrađen je hodografski prikaz vjetra na mjernoj postaji u ljetnoj sezoni za dane u kojima je sinoptička situacija mirna i utjecaj pretpostavljene cirkulacije duž Velebitskog kanala vidljiv na mjerenjima. Kriterij za takve dane bio je da postoji vjetar iz smjera u rasponu od zapada do sjevera



Slika 5.3. Hodograf vektorskog srednjaka horizontalnog vjeka u satu naznačenom uz točku za odabrane dane. Sati su izraženi u lokalnom vremenu. Boja označava vertikalnu komponentu vjeka u pojedinom satu.

brzine barem 2 m s^{-1} i trajanja od barem 6 h. Podaci za te dane, koji čine 53 % svih ljetnih dana, usrednjeni su po satu i po svim danima. Rezultat je prikazan na slici 5.3, gdje točke označavaju vektor srednjeg horizontalnog vjetra u satu naznačenom uz točku, a boja označava vertikalnu komponentu vjetra u tom satu u lokalnom vremenu. Jasno je vidljiva rotacija vektora u smjeru kazaljke na satu tijekom noći, ali u dnevnom razdoblju zakreće u smjeru obrnutom od kazaljke. Pretpostavljamo da je to posljedica opisane cirkulacije, odnosno vrlo složenog utjecaja terena. Tijekom dana, između 11 i 19 h, vjetar je jači i stalnijeg smjera što se vidi iz izdužene petlje koju vektor vjetra opisuje u tom razdoblju. Tada dostiže brzine i do 5 m s^{-1} , a srednji smjer mu je sjever-sjeverozapad. Ovi rezultati u skladu su s diskusijama u poglavlju 3. te se mogu prepoznati i u tablicama 3.1 i 3.2. Uz relativno veće dnevne horizontalne brzine vjetra javlja se i uzlazno gibanje kao posljedica zagrijavanja okolnog tla. Noću je registrirani vjetar izrazito slab i većinom s jugoistoka. Vertikalno gibanje je očekivano silazno, ali za čak red veličine slabije nego danju. To je još jedan dokaz slabije noćne obalne cirkulacije te podupire ideju ovog rada o cirkulaciji duž Velebitskog kanala. Iz svega se može zaključiti da je zanimljiva dinamika koja se javlja u dolini Velebitskog kanala posljedica njene orografske asimetričnosti zbog relativno nižih otoka s jedne strane, visokog Velebita s druge strane i morske površine u njenom središtu.

S obzirom na ograničenosti ovog rada, nažalost nije bilo moguće još nekim argumentima poduprijeti ovu hipotezu, pa se za sad njome ne može sa sigurnošću objasniti dnevno strujanje kod Masleničkog mosta. Za buduća istraživanja potrebno je na više lokacija na obali Velebitskog kanala provoditi minimalno satna mjerenja brzine i smjera vjetra te temperature i vlage. Ništa manje važni nisu ni podaci o morskom strujanju na površini te podaci o razini mora, koja bi u skladu s ovom hipotezom trebala tijekom dana biti relativno viša na jugoistočnom dijelu kanala. Osim toga, bilo bi korisno istražiti razlike u razdobljima osunčanosti uzvisina koje zatvaraju doline, odnosno visokog Velebita i relativno nižih otoka. Osim konkretnih mjerenja, izrada numeričkih simulacija također je relevantna te bi mogla pružiti dodatnu polaznu točku za buduća istraživanja ovog fenomena.

6. Zaključak

Bura i jugo olujni su vjetrovi dominantni na istočnoj Jadranskoj obali. Po sinoptičkom tipu razlikujemo ciklonalni, anticiklonalni i frontalni tip tih vjetrova te je svaki povezan s karakterističnim vremenskim prilikama. Bura se još može klasificirati po tipu strujanja na duboku i plitku uz pomoć visinskog profila vjetra. S obzirom na blizinu obale i Velebita u odnosu na lokaciju mjerenja, očekivan je utjecaj termalno vođene obalne cirkulacije i cirkulacije obronka na strujanje zraka, posebice u toplom dijelu godine. Temelj ovog rada primarno su mjerenja komponenata brzine vjetra na 10 m visine na Mikrometeorološkoj postaji Maslenica. Uz njihove 10-minutne srednje vrijednosti koristile su se po potrebi i dodatne informacije o oborini, temperaturi, relativnoj vlazi i radiosondažnim mjerenjima s obližnje meteorološke postaje Zadar-Zemunik.

Prvo je prikazan opći pregled vjetra na lokaciji Mikrometeorološke postaje Maslenica u obliku ruža vjetra i tablica relativnih čestina za potrebe kojih je vjetar klasificiran po brzini, vremenu i trajanju pojedine epizode. Rezultati pokazuju da je bura najizraženiji i najjači vjetar na mjerenoj lokaciji, a zatim slijedi jugo i sjeverozapadnjak. Što se tiče sezonskih varijacija, bura je najčešća u jesen, ali svoje najveće brzine dostiže u zimskom razdoblju kada su općenito najviše uočen jak vjetar, a najzastupljeniji je jugo. Suprotno, u ljetnom razdoblju vjetar uzrokovan sinoptičkim poremećenjima vrlo je malo zastupljen u odnosu na vjetar sjeverozapadnog smjera. Po trajanju, bura ima najduže epizode, a zatim slijedi jugo i vjetar iz smjera istoka, koji se osim u obliku levanta javlja i kao prijelazni vjetar iz juga u buru pri prolasku ciklone preko Jadrana.

U drugom dijelu rada od interesa su bile karakteristike pojedinog sinoptičkog tipa jake bure i juga uz određivanje tipa strujanja bure. Analiza reprezentativnih primjera za anticiklonalnu, ciklonalnu i frontalnu buru te ciklonalno jugo potvrdila je već poznata saznanja o vremenskim prilikama koje se vežu za njih. Duboka anticiklonalna bura sa sobom je donijela vrlo suho i vedro vrijeme kod Zadra, dok je za vrijeme plitke ciklonalne bure vrijeme relativno vlažnije te oblačno i kišno. Frontalna bura, vrlo plitka i kratkotrajna, bila je uzrokovana naglim prolaskom hladne fronte iz smjera sjeveroistoka. Tijekom te epizode nad Zadrom je bilo oblačno i hladno, što je za očekivati s obzirom na velike gradijente meteoroloških elemenata u blizini fronte. Tijekom ciklonalnog juga na području Zadra vladale su kišne i vrlo vlažne vremenske prilike. Usporedba varijabilnosti smjera vektora vjetra tijekom pojedine epizode bure i juga pokazala je da jugo ima gotovo dvostruko veći raspon smjera od bure unutar pojedine epizode.

Kako je tijekom istraživanja u ljetnom razdoblju primijećen izraženi vjetar dnevnog hoda čiji smjer ne odgovara klasičnom modelu obalne cirkulacije, u ovom radu predstavljena je hipoteza o termalnoj cirkulaciji duž Velebitskog kanala koja bi mogla

objasniti mehanizam generiranja tog vjetra. Komplikiran utjecaj terena može se predočiti svojevrsnom dolinom koju zatvaraju otoci i Velebit s morskom površinom u sredini, s otvorenim sjeverozapadnim krajem i zatvorenim jugoistočnim na čijem je vrhu smještena Mikrometeorološka postaja Maslenica. Stoga cirkulacija duž Velebitskog kanala predstavlja superpoziciju obalne cirkulacije, cirkulacije obronka i cirkulacije doline.

Iako su se u ovom radu koristili podaci tek 14-mjesečnog razdoblja, to je najdulji vremenski period za koji je prikazan ovakav sinoptički i statistički pregled strujanja kod Maslenice; stoga mu je glavna namjena pružiti početnu točku za buduća istraživanja vjetra na tom području. Također, ovaj rad potiče i na daljnje istraživanje termalno vođene cirkulacije duž Velebitskog kanala, što može uključivati mjerenja vjetra i morske razine na više lokacija duž područja od interesa, kao i numeričke simulacije pripadnog strujanja.

Literatura

- Bajić, A. (2011). *Prostorna raspodjela očekivanih maksimalnih brzina vjetra na složenom terenu Hrvatske kao podloga za ocjenu opterećenja vjetrom*. Doktorski rad, Prirodoslovno-matematički fakultet, Sveučilište u Zagrebu.
- Belušić, D. i Bencetić Klaić, Z. (2006). Mesoscale dynamics, structure and predictability of a severe Adriatic bora case. *Meteorologische Zeitschrift* 15, 157–168.
- Defant, F. (1951). *Local Winds*, pp. 655–672. Boston, MA: American Meteorological Society.
- Gašpar, J. (2019). Istražili smo: Autocesta kod Maslenice u 11 godina je bila zatvorena 575 puta. <https://morski.hr/2020/02/06/istrazili-smo-autocesta-kod-maslenice-u-11-godina-je-bila-zatvorena-575-puta/> *Morski HR*. Pristupljeno 27. srpnja 2022.
- Gill Instruments Ltd. (2010). *WindMaster and WindMaster Pro Ultrasonic Anemometer*. Gill Instruments Limited.
- Giovannini, L., Laiti, L., Serafin, S., i Zardi, D. (2017, 06). The thermally driven diurnal wind system of the Adige Valley in the Italian Alps. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 143.
- Grisogono, B. i Belušić, D. (2009). A review of recent advances in understanding the meso- and microscale properties of the severe bora wind. *Tellus A* 61(1), 1–16.
- Ivančan-Picek, B., Jurčec, V., i Drvar, D. (2006). On the causes of Adriatic jugo wind variations. *Hrvatski meteorološki časopis* 41(41), 21–32.
- Jurčec, V. (1988). The Adriatic frontal bora type. *Hrvatski meteorološki časopis* 23(23), 13–25.
- Kusuda, M. i Alpert, P. (1983). Anti-clockwise rotation of the wind hodograph. Part I: Theoretical study. *Journal of the Atmospheric Sciences* 40, 487–499.
- Lisac, I., Zelenko, B., Marki, A., i Trošić, Ž. (1999). Wind direction frequency analysis for the jugo wind in the Adriatic. *Hrvatski meteorološki časopis* 33/34(33/34), 19–37.
- Lukšić, I. (1989). Diurnal winds in Senj. *Geofizika* 6, 59–74.
- Orlić, M., Penzar, B., i Penzar, I. (1988). Adriatic sea and land breezes: Clockwise versus anticlockwise rotation. *Journal of Applied Meteorology* 27, 675–679.
- Penzar, B., Penzar, I., i Orlić, M. (2001). *Vrijeme i klima hrvatskog Jadrana*. Dr. Feletar.

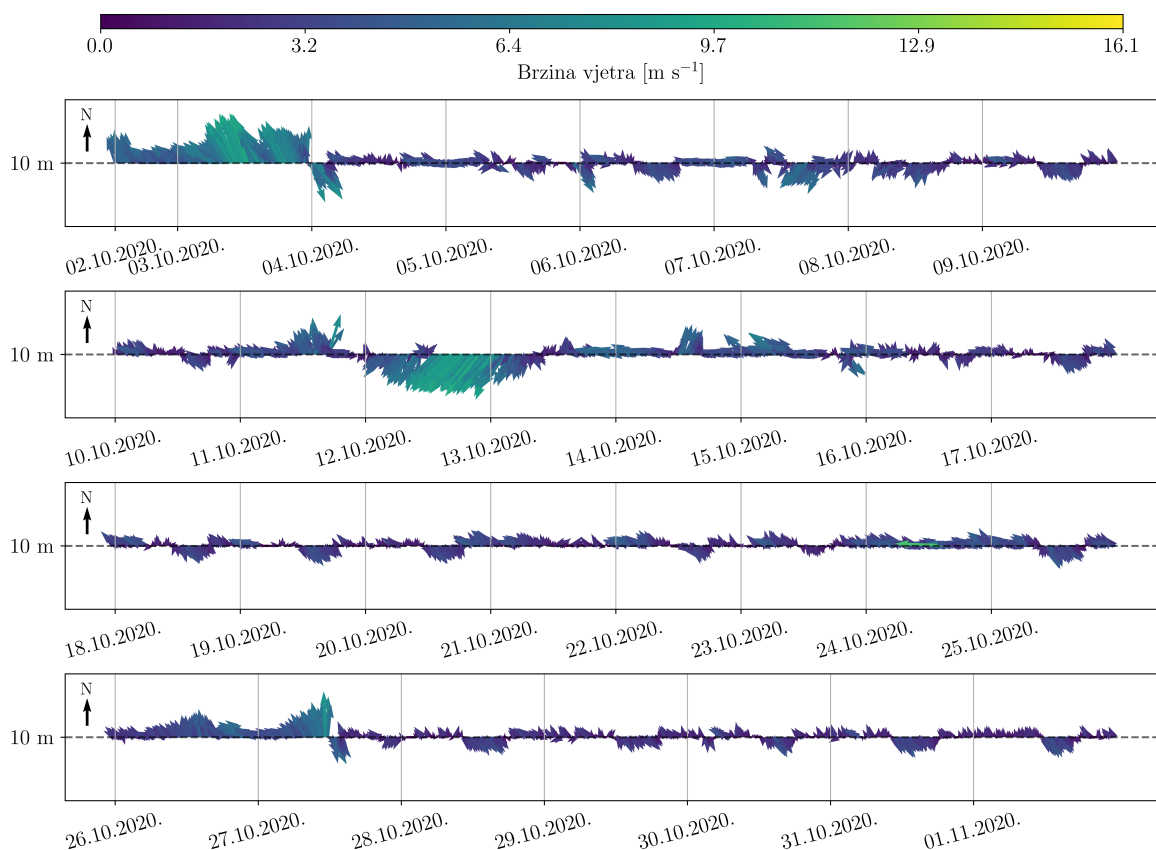
- Poje, D. (1992). Wind persistence in Croatia. *International Journal of Climatology* 12(6), 569–586.
- Prtenjak, M. T. (2003). Main characteristics of sea/land breezes along the eastern coast of the Northern Adriatic. *Geofizika* 20, 75–92.
- Prtenjak, M. T. (2006). *Numeričko simuliranje obalne cirkulacije zraka na sjevernom Jadranu*. Doktorski rad, Prirodoslovno-matematički fakultet, Sveučilište u Zagrebu.
- Radić, J., Savor, Z., i Puž, G. (2003). Report: Extreme wind and salt influence on Adriatic bridges. *Structural Engineering International* 13(4), 242–245.
- Sesar, P. i Krečak, A. (2005). Impact of wind bora on Croatian highways and bridges. *IABSE Symposium Report 90*, 23–29.
- Večenaj, Ž. (2005). Procesi makrorazmjera kod olujnog vjetra u Dalmaciji. Diplomski rad, Prirodoslovno-matematički fakultet, Sveučilište u Zagrebu.
- Šoljan, V., Belušić, A., Šarović, K., Nimac, I., Brzaj, S., Suhin, J., Belavić, M., Večenaj, Ž., i Grisogono, B. (2018). Micro-scale properties of different bora types. *Atmosphere* 9(4), 25.
- Zajec, A. (2022). Prva analiza mikroskalnih karakteristika juga. Diplomski rad, Prirodoslovno-matematički fakultet, Sveučilište u Zagrebu.

Popis kratica

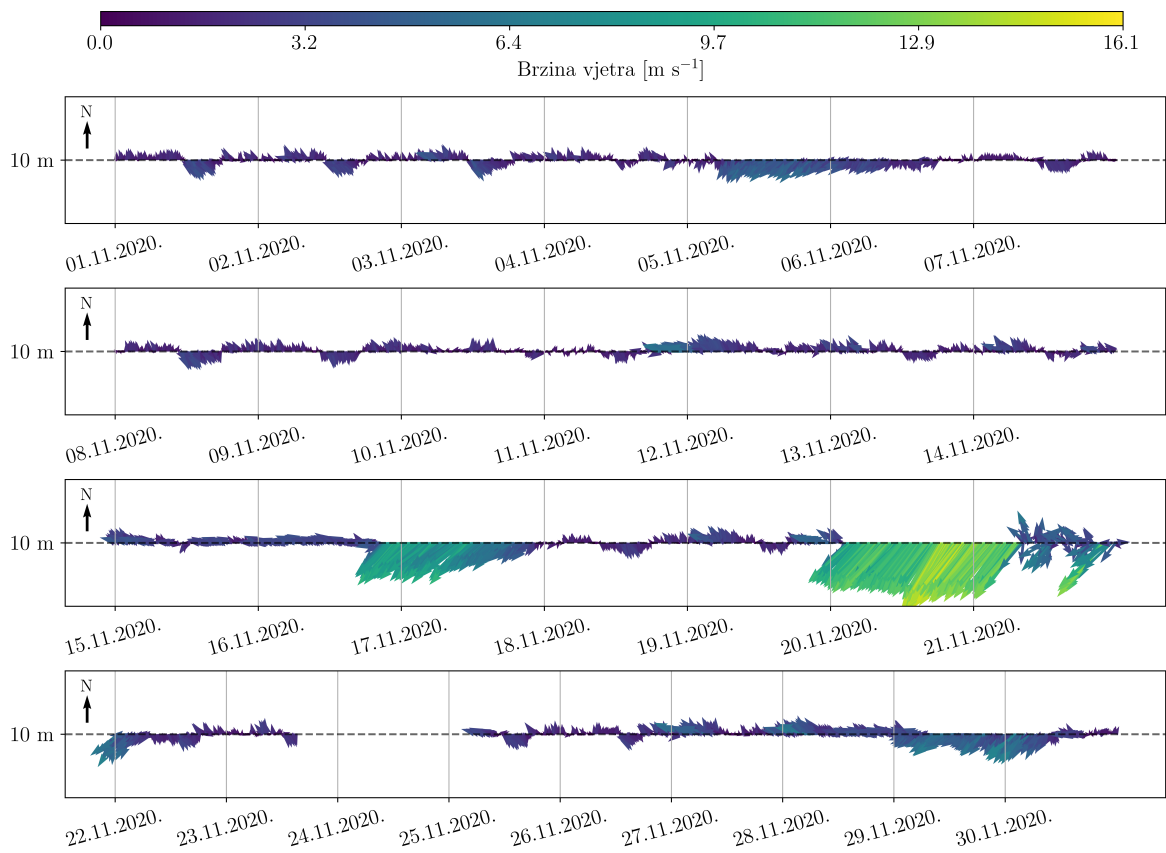
| | |
|-------|---------------------------------|
| AC | anticiklonalno |
| C | ciklonalno |
| DHMZ | Državni hidrometeorološki zavod |
| E | istok |
| ENE | istok-sjeveroistok |
| ESE | istok-jugoistok |
| F | frontalno |
| N | sjever |
| NE | sjeveroistok |
| NNE | sjever-sjeveroistok |
| NNW | sjever-sjeverozapad |
| NW | sjeverozapad |
| p | tlak zraka |
| RH | relativna vlažnost |
| S | jug |
| SE | jugoistok |
| SSE | jug-jugoistok |
| SSW | jug-jugozapad |
| SW | jugozapad |
| T | temperatura zraka |
| T_d | temperatura rosišta |
| u | zonalna komponenta brzine |
| UTC | koordinirano svjetsko vrijeme |
| v | meridionalna komponenta brzine |
| v_H | horizontalna brzina |
| w | vertikalna komponenta brzine |
| W | zapad |
| WNW | zapad-sjeverozapad |
| WSW | zapad-jugozapad |

Dodatak A Vektor dijagrami

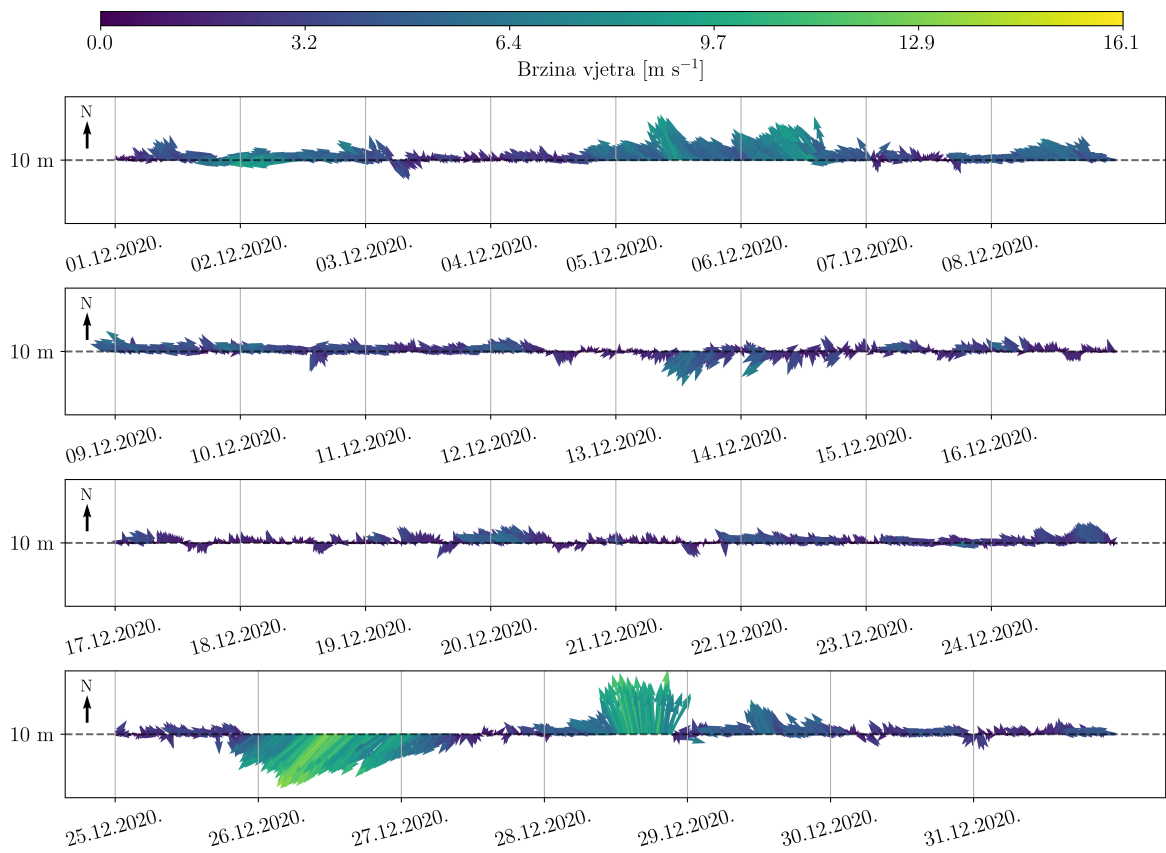
U dodatku su priloženi svi vektor dijagrami u analiziranom razdoblju koje obuhvaća period od listopada 2020. do studenog 2021. godine. Jak vjetar čije su epizode izdvojene prema kriterijima u poglavlju 4. klasificiran je po smjeru upravo prema ovim prikazima. Duljina i boja vektora označavaju brzinu vjetra u jedinicama m s^{-1} , a smjer sjevera naznačen je u gornjem lijevom uglu na svakom prikazu.



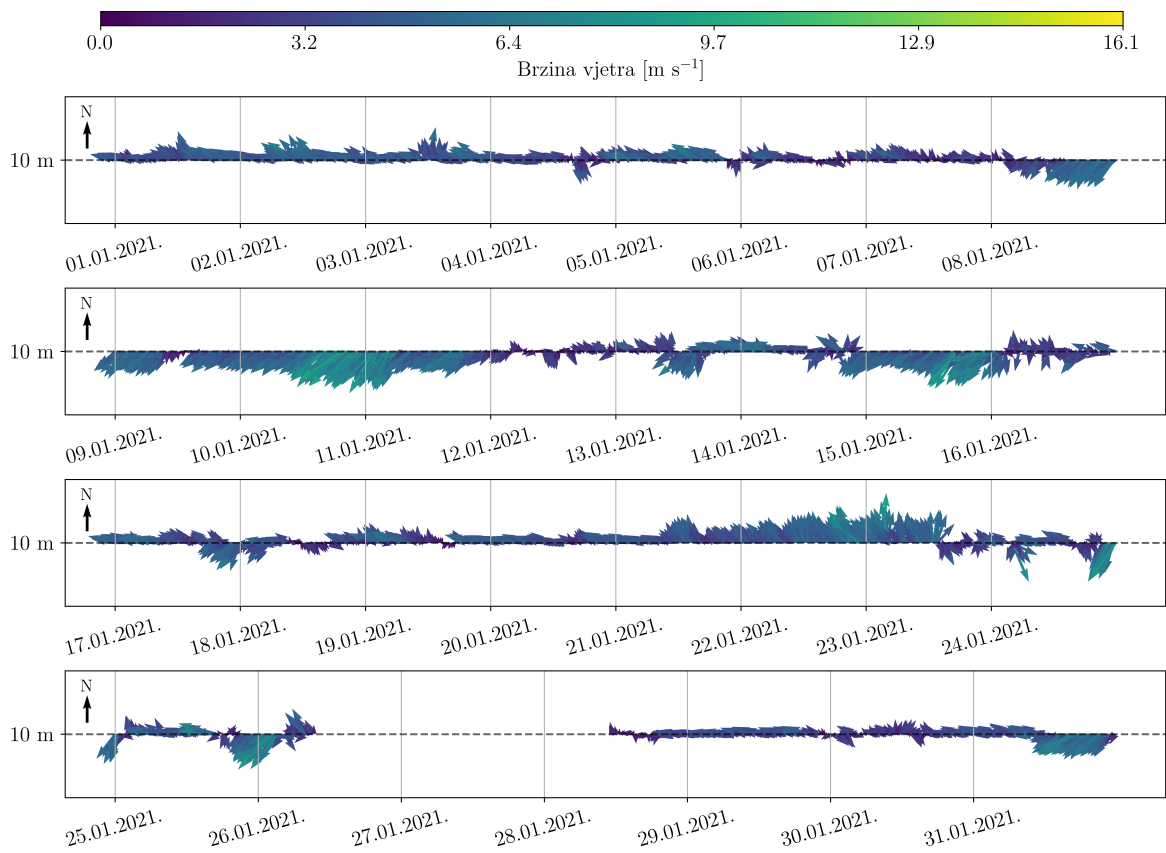
Slika A1. Vektor dijagram 10-minutnih srednjaka brzine i smjera vjetra na 10 m visine tijekom listopada 2020. godine. Duljina i boja vektora označavaju brzinu vjetra u jedinicama m s^{-1} .



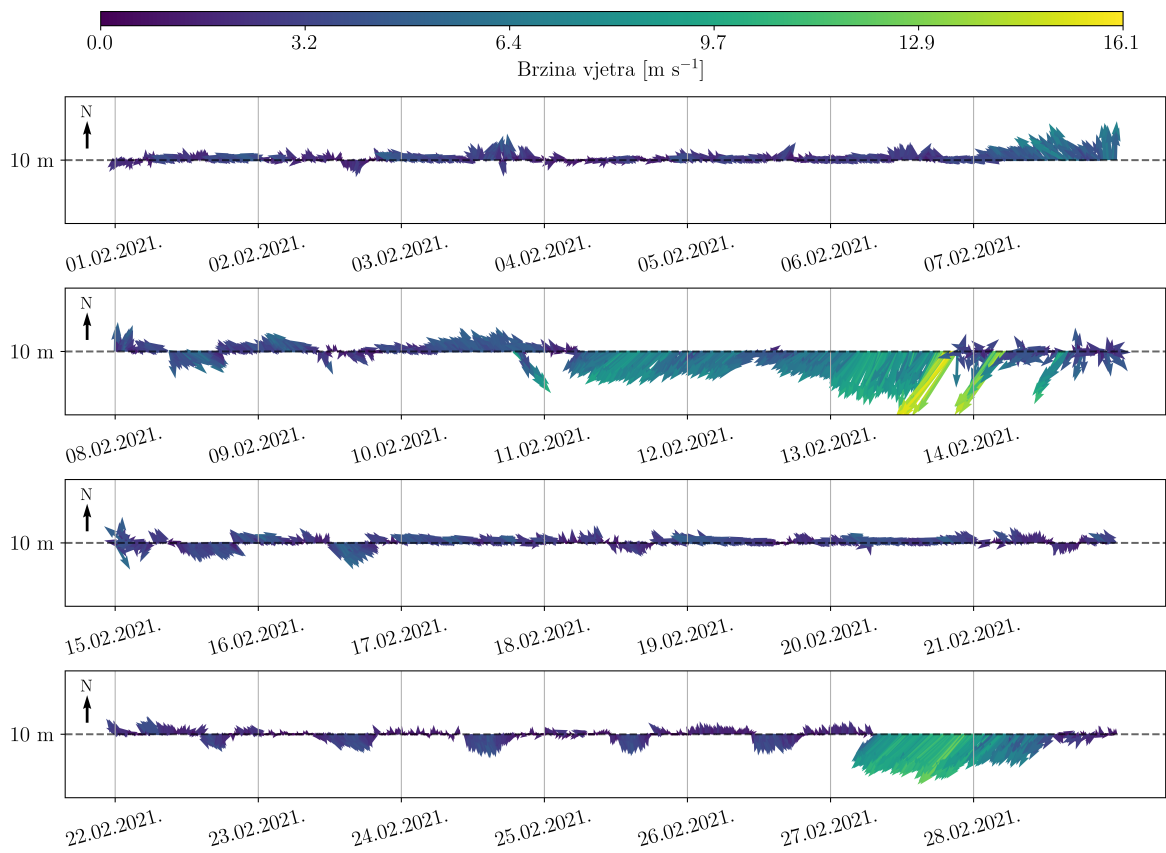
Slika A2. Isto kao i na slici A1, ali za studeni 2020. godine.



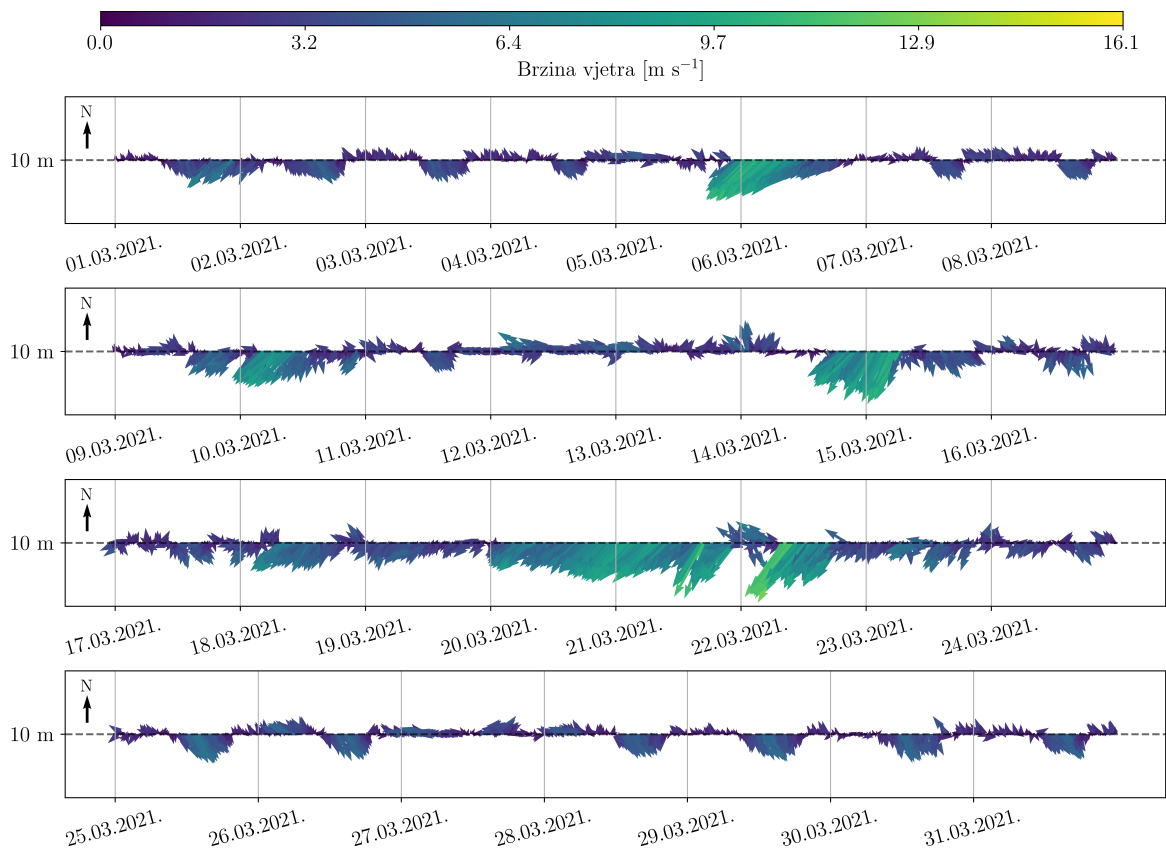
Slika A3. Isto kao i na slici A1, ali za prosinac 2020. godine.



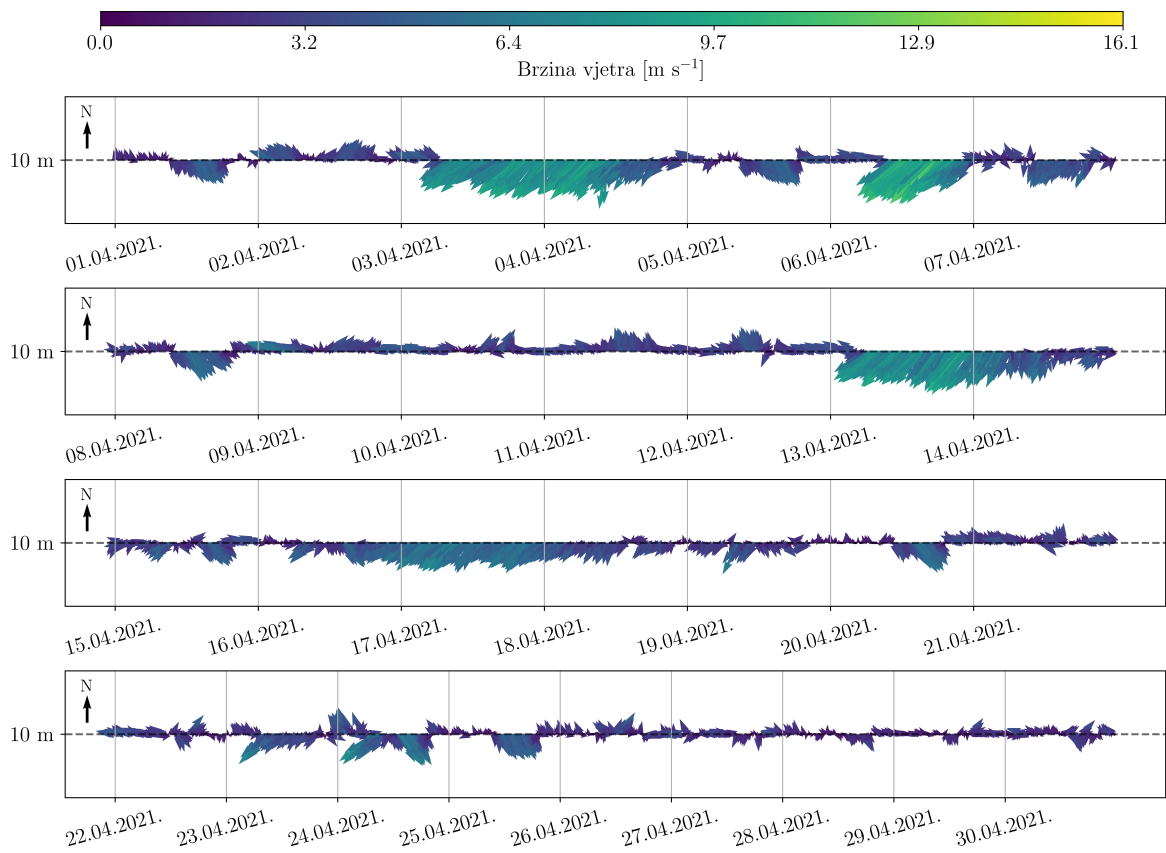
Slika A4. Isto kao i na slici A1, ali za siječanj 2021. godine.



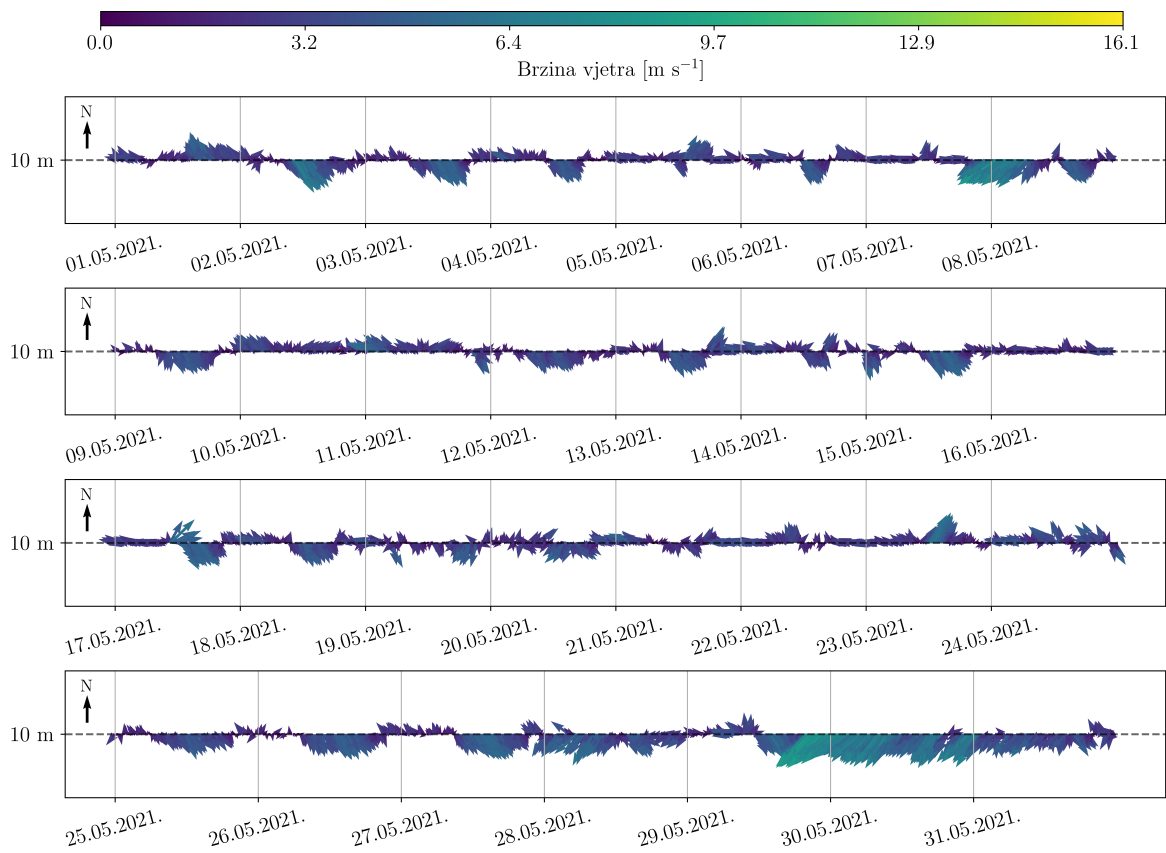
Slika A5. Isto kao i na slici A1, ali za veljaču 2021. godine.



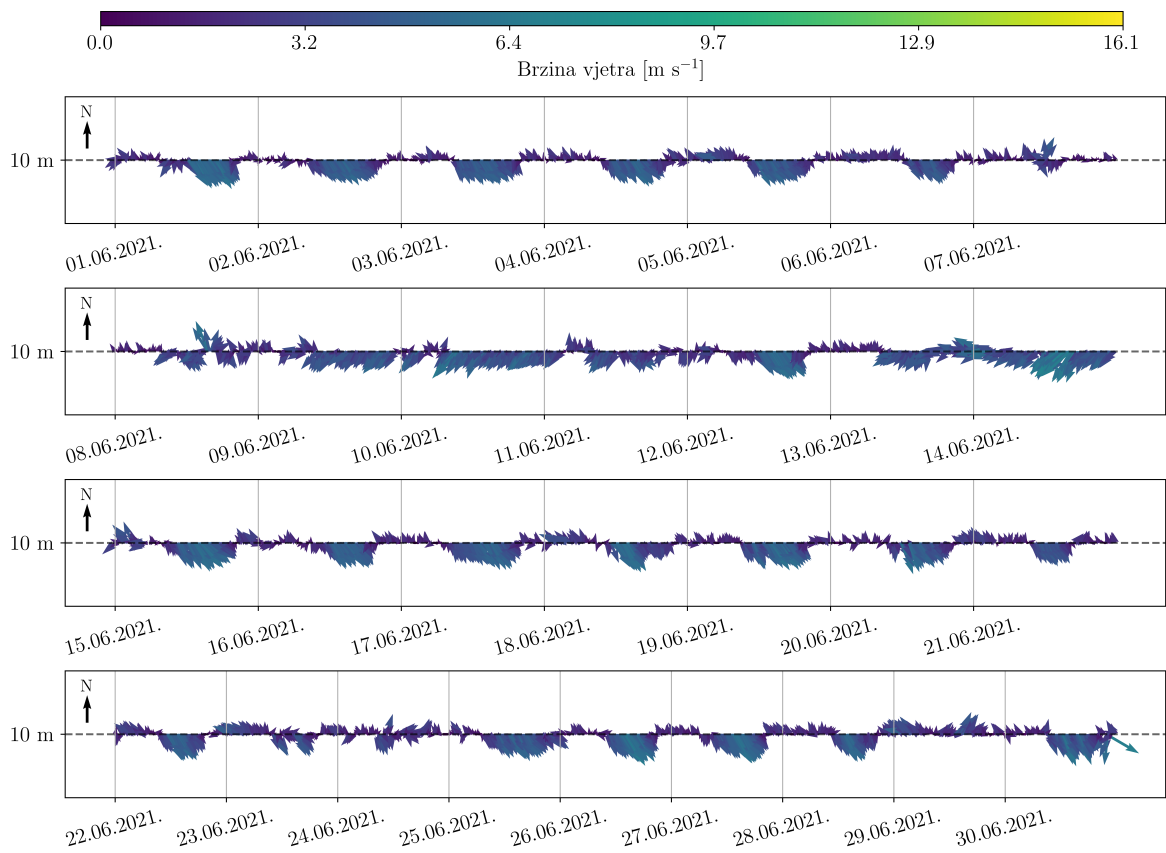
Slika A6. Isto kao i na slici A1, ali za ožujak 2021. godine.



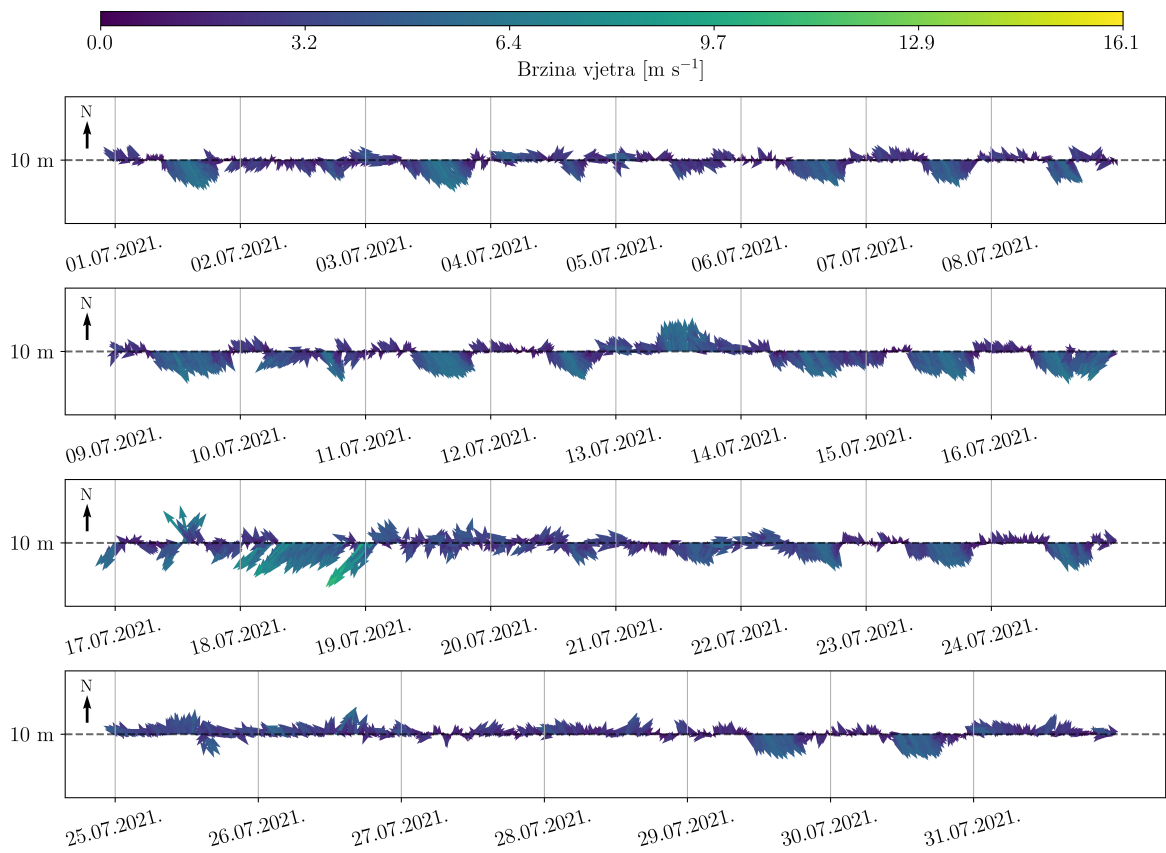
Slika A7. Isto kao i na slici A1, ali za travanj 2021. godine.



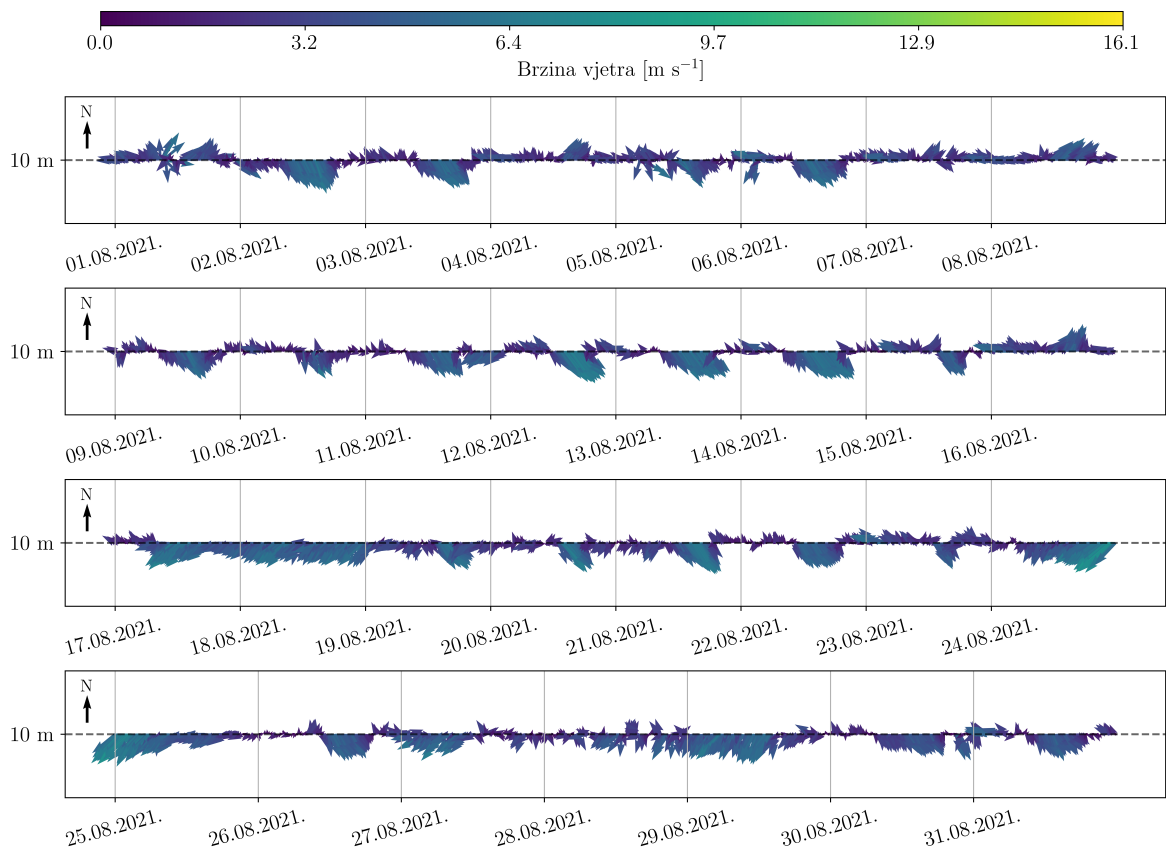
Slika A8. Isto kao i na slici A1, ali za svibanj 2021. godine.



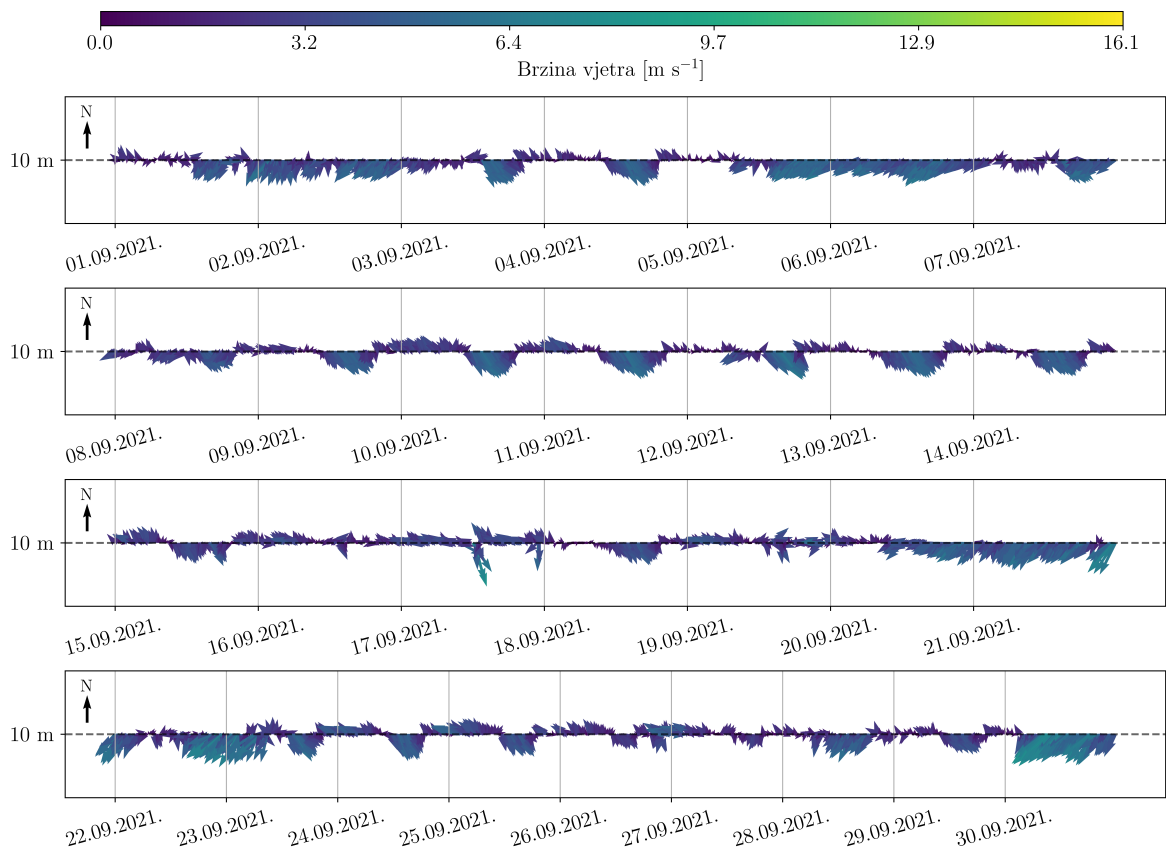
Slika A9. Isto kao i na slici A1, ali za lipanj 2021. godine.



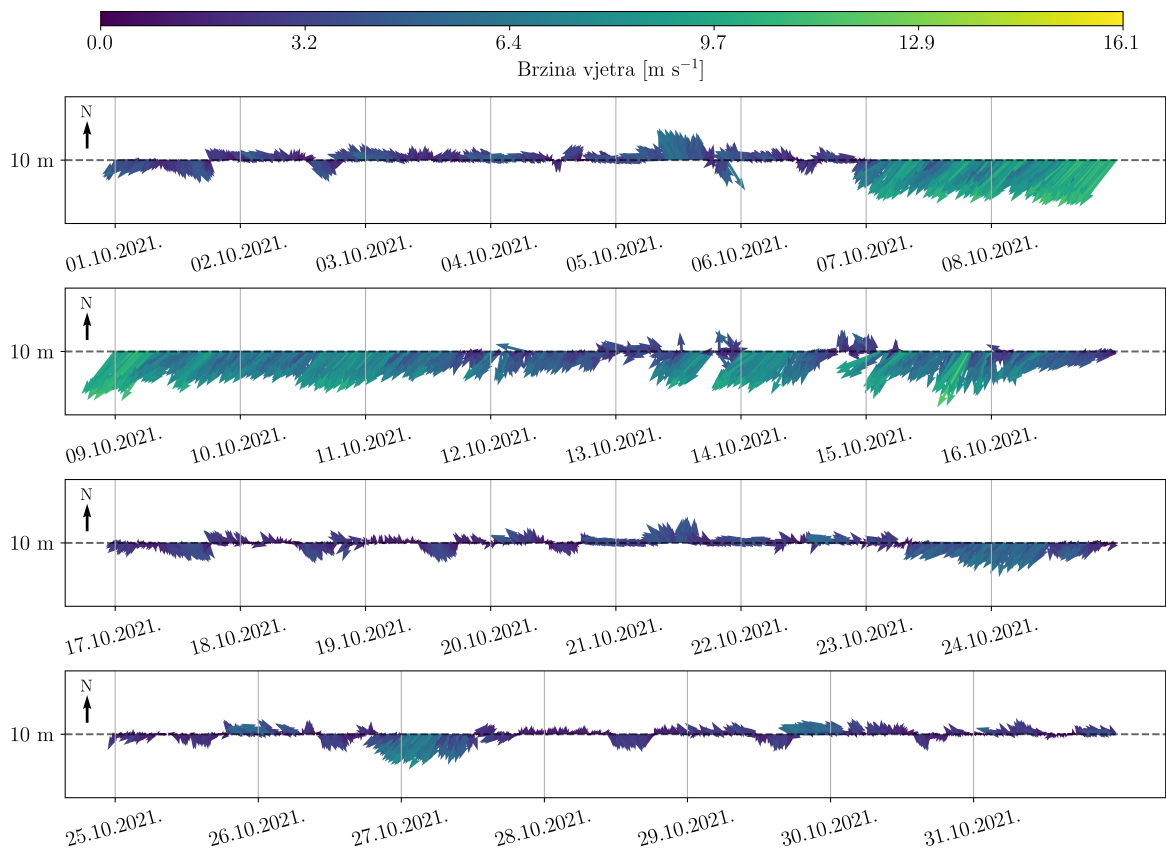
Slika A10. Isto kao i na slici A1, ali za srpanj 2021. godine.



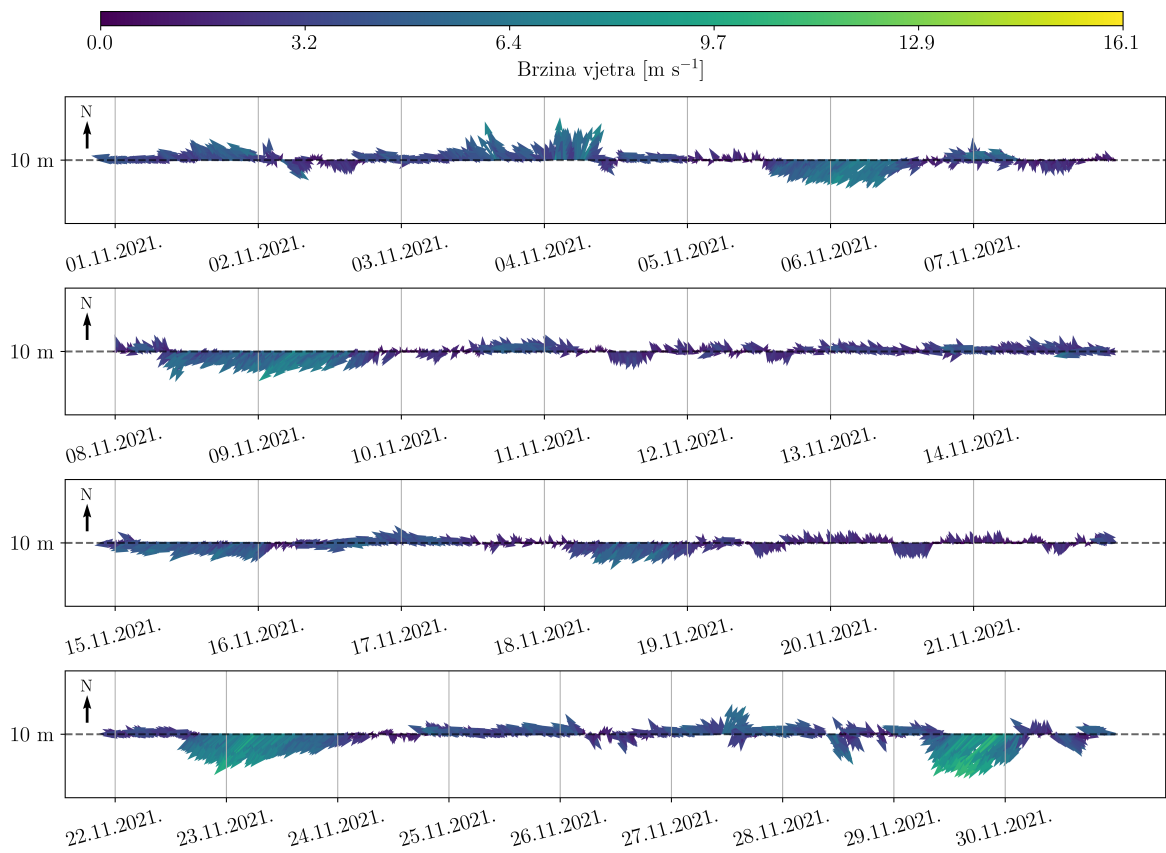
Slika A11. Isto kao i na slici A1, ali za kolovoz 2021. godine.



Slika A12. Isto kao i na slici A1, ali za rujan 2021. godine.



Slika A13. Isto kao i na slici A1, ali za listopad 2020. godine.



Slika A14. Isto kao i na slici A1, ali za studeni 2021. godine.