

Obilježja atmosferskih ("Mohorovičićevih") rotora na Kvarneru

Tkalec, Emil

Master's thesis / Diplomski rad

2020

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:217:647512>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-23**



Repository / Repozitorij:

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





SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET

GEOFIZIČKI ODSJEK

Emil Tkalec

OBILJEŽJA ATMOSFERSKIH
("MOHOROVIČIĆEVIH") ROTORA NA
KVARNERU

Diplomski rad

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

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

Emil Tkalec

Diplomski rad

**Obilježja atmosferskih ("Mohorovičićevih")
rotora na Kvarneru**

Voditelj diplomskog rada:

izv. prof. dr. sc. Maja Telišman Prtenjak

Zagreb, 2020.

Veliko hvala mentorici izv. prof. dr. sc. Maji Telišman Prtenjak na velikoj strpljivosti, stručnosti, ažurnosti i nesebičnim savjetima.

Zahvaljujem se djelatnicima Hrvatske kontrole zračne plovidbe na ustupljenim podacima, naročito Jadranu Jurkoviću na stručnim savjetima i poticaju.

Veliko hvala mojoj ženi i djeci što su mi bili potpora i omogućili mi da na miru radim na diplomskom radu.

Ovaj rad prosvjećujem svoj prerano preminuloj majci, koja mi je uvijek bila najveća podrška te je moj anđeo koji me čuva i daje mi snagu da prevladam nove izazove.

Sažetak

Rezultati (vrlo rijetkih) numeričkih studija iako otkrivaju detalje prostorne i vremenske strukture vrtložnog strujanja baziraju se na simulaciji jednog odabranog slučaja u Kvarnerskom zaljevu. Kako se dostupnost mjerenja u zadnjih 20-ak godina povećala, cilj ovog rada je bio iskoristiti postojeća mjerenja Zračne luke Pula, Zračne luke Rijeka i Zračne luke Zagreb da bi se pronašle strukture koje odgovaraju horizontalnom atmosferskom rotoru. Kao rezultat, pokazano je da se „Mohorovičićevi“ rotori mogu identificirati uz pomoć dostupnih mjerenja. Detaljnije su opisane specifičnosti horizontalnog rotora za tri slučaja, gdje je ukazano da su horizontalni rotori dinamična struktura u prostoru i vremenu za čiji nastanak su potrebni specifični vremenski uvjeti zajedno s specifičnom konfiguracijom terena i prisustvom mora. Dostupni nizovi meteoroloških podataka dali su nova klimatska obilježja ovog fenomena što svakako doprinosi širenju saznanja o Mohorovičićevim rotorima i buri u Kvarnerskom zaljevu.

Ključne riječi

Horizontalni rotor, Zračna luka Rijeka, Zračna luka Zagreb, Zračna luka Pula, Mohorovičić, bura, Kvarnerski zaljev

Thesis

Characteristics of atmospheric ("Mohorovičić") rotors within Kvarner area

Abstract

The results of (very rare) numerical studies, although revealing details of the spatial and temporal structure of the vortex current, are based on the simulation of a one single case in the Kvarner Bay. As the availability of measurements has increased over the last 20 years, the aim of this master's thesis was to use existing measurements of Pula Airport, Rijeka Airport and Zagreb Airport to find structures that fit the horizontal atmospheric rotor. As a result, it has been shown that "Mohorovičić" rotors can be identified using the available measurements. The detailed characteristics of the horizontal rotor for three cases were described, where it was indicated that the horizontal rotors are a dynamic structure in space and time. To form, specific weather conditions together with a specific terrain configuration and the presence of the sea is required. The available meteorological data sets have provided new climatic characteristics of this phenomenon, which certainly contributes to the spread of knowledge about Mohorovičić rotors and bora within the Kvarner Bay.

Keywords

Horizontal Rotor, Rijeka Airport, Zagreb Airport, Pula Airport, Mohorovičić, bora, Kvarner Bay

Sadržaj

1. UVOD.....	6
1.2. Bura i rotor	6
1.2.1. Općenito o buri	6
1.2.2. Koncept nastanka olujne bure	8
1.2.3. Mohorovičićevo otkriće atmosferskih rotora	10
1.2.4. Današnje spoznaje o atmosferskim rotorima	12
1.3. Cilj rada i motivacija	14
2. OBILJEŽJA PODRUČJA ISTRAŽIVANJA I KORIŠTENIH METODA	15
2.1. Opis područja istraživanja i mjerenja	15
2.2. Obilježja bure nad područjem Kvarnera.....	18
2.3. Kriteriji odabira rotora.....	20
3. KLIMATOLOŠKA OBILJEŽJA ISTRAŽIVANIH LOKACIJA.....	21
3.1. Zračna luka Rijeka	21
3.2. Zračna luka Pula.....	25
3.3. Zračna luka Zagreb.....	29
4. REZULTATI ISTRAŽIVANJA ROTORA.....	35
4.1. Identificiranje rotora.....	35
4.2. Analiza trajanja rotora	36
4.3. Analiza odabranih slučajeva iz seta podataka	37
4.3.1. Idealan primjer rotora	37
4.3.2. Rotor s pomicanjem osi vrtloženja u prostoru.....	42
4.3.3. Suhi rotor	44
5. ZAKLJUČAK.....	50
6. LITERATURA	52
Prilog A	55
Prilog B	57

1. UVOD

„...A jer vladavcu nebeskomu grih nijedan jini nî tuko kuko nesaznanje mrsko, tudihtaj iz vedra neba strašnim i sverutnim triskom meu sve ke toti bihu nju samu udrivši u propast paklenu u vike osudi. I tako okonja i u vičnjih mukah mučeci se nesaznanje plaća. I vazda, kada kojagod žena krozi ta grih k njoj se pridruži, na svoje raskošne spominajući se gorko cvileći prijadovno uzdiše, i od toga uzdaha vitar ta tvori se i iz paklenih vrat oganj dimom modročrljenim kroz ova zjatja, koja, kako vidiš, eto pravo pod misto ono jesu ko vi općeno Vražja Vrata zovete, i van ishodi. I koliko zlo, navlastito u naših deželjah, čini, nî treba da ti spovidam. I jer u životu Bura zvana bi, vitar ta nje glas uzdrži i uvijek uzdržati hoće. – Zaisto nemalo počudih se tomu i pake tako rekoh: – Dostojan i pravedan svaki sud božji jest, najkoli krozi nesaznanje, i molim svemogoga da svaka nesaznana u takov sud upade...“ tim je riječima stari hrvatski pisac Petar Zoranić u knjizi Planine, davne 1536. godine opisao fenomen bure na Jadranu.

Oduvijek su stanovnici Jadrana poznali buru i živjeli s njom. Naziv bura potječe iz grčkog βορέας što znači sjeverni vjetar (Yoshino, 1976). Bura je obično suh, hladan i jak sjeveroistočni vjetar koji puše na mahove te određuje specifične vremenske prilike. Jedna od zanimljivih specifičnosti je pojava zračnih rotora tijekom bure, koje je opazio i dokumentirao Andrija Mohorovičić na području Bakarskog zaljeva krajem devetnaestog stoljeća. Kako danas postoji mnogo više mjernih postaja/podataka nego u Mohorovičićevo doba, današnje meteorološke informacije nam omogućavaju produbljivanje i proširivanje meteoroloških znanja te bacanje novog svjetla na Mohorovičićevo otkriće.

1.2. Bura i rotor

1.2.1. Općenito o buri

Pojava snažnih zračnih strujanja koja narušavaju sigurno odvijanje brodskog, zračnog ili kopnenog prometa donosi mnoge probleme svakome tko živi na zahvaćenom području (Slika 1). Bura je jak vjetar koji u većini slučajeva otežava promet u Hrvatskoj, a ponekad ga i paralizira u potpunosti. Za dobro prognoziranje bure (početak, trajanje, intenzitet, prostorna pokrivenost) je važno poznavati u kojim uvjetima nastaje. Bura se pomnije počela proučavati odmah nakon što su pokrenuta meteorološka mjerenja u Dubrovniku 1851. godine. Jednu od prvih znanstvenih studijana temu bure je izradio Hann 1868. godine. Prvu prostornu raspodjelu jakog vjetra na Jadranu predstavio je Defant 1924. godine, a prvu studiju o buri izradio je Band 1950. godine detaljno proučavajući buru duž istočne obale Jadrana. Od tada do danas, mnogi su znanstvenici proučavali fenomen bure, a neki od njih su: Yoshino (1976), Smith (1987), Doyle i Durran (2002, 2004, 2007), Grisogono i Belušić (2009), Telišman Prtenjak i Belušić (2009) i drugi.



Slika 1. Bura u Ninu (Wikipedia [6. listopada 2019.], dostupno na: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a5/Nin_%28bura2%29.JPG).

Opći preduvjet za nastanak bure je postojanje značajne velikog baričkog gradijenta usmjerenog u smjeru kopno – more te orografske prepreke okomite na strujanje (uvjeti tipični za jadransku obalu). Strme padine pogoduju jakom ubrzavanju zračne struje, pa jadranska bura može biti olujna, a ponekad i orkanska¹. Najsnažniji zabilježen udar bure u Hrvatskoj, zbio se 23. prosinca 2003. godine, na autocesti A1, vijadukt Božići. Tada je anemometar zabilježio brzinu udara bure od 85,28 m/s (~ 307 km/h), što je neslužbeno najveća ikad izmjerena brzina vjetra u Hrvatskoj. Zbog činjenice da anemometar koji je izmjerio navedenu brzinu vjetra nije predviđen za tolike iznose (Wind Set WA15), podatak se ne uzima kao službeni. Najjači službeni udar bure od 69,00 m/s (~ 248 km/h) je zabilježen 21. prosinca 1998. godine na Masleničkom mostu. Na 10 km od obale intenzitet bure slabi. U pojasu intenzivnog djelovanja bura stvara niske valove s bijelim „krijestama“ te nastaje sitna maglica sastavljena od vode i soli koja se raspršuje na kopnu.

Bura se može tipizirati prema sinoptičkom okruženju i prema intenzitetu. Prema utjecaju sinoptičkih formacija u polju tlaka djelimo je na ciklonalnu/frontalnu i anticiklonalnu. Raspodjela sniženog tlaka nad Jadranom doprinosi stvaranju „ciklonalne bure“ kao rezultat ciklone nad Jadranom ili srednjim Sredozemljem (npr. Horvath *et al.*, 2008) te „frontalne bure“ povezanu s advekcijom hladnog zraka s viših geografskih širina u najjužnijem dijelu kontinentalne ciklone. Povišeni tlak nad obalnim dijelom može biti združen s pojavom "anticiklonalne bure" uzrokovane kontinentalnom anticiklonom koja zahvaća Balkanski poluotok često tijekom jesenskih ili zimskih mjeseci. Za vrijeme puhanja ciklonalne/frontalne bure je većinom oblačno

¹ Prema Beaufortu, orkanski vjetar je jačine 12 bofora tj. brzina mu je veća od 32,7 m/s ~ 118 km/h

vrijeme s kišom, a u zimi može padati i snijeg. Anticiklonalna bura je obično povezana s uvjetima vedrog neba.

Prema intenzitetu postoji jaka i slaba bura, a najčešće tri teorije objašnjavaju osnovnu dinamiku njenog nastanka. Jaka bura se objašnjava (i) hidrauličkom teorijom. Ona opisuje prijelaz hidrauličkog toka iz subkritičnog u nadkritično stanje u planinskoj zavjetrini te završava formiranjem hidrauličkog skoka (npr. Grubišić, 2004; Grisogono i Belušić, 2009; Večenaj *et al.*, 2012; Belušić *et al.*, 2013). Kod slabijih bura nije isključen termički efekt te se objašnjavaju (ii) katabatičkom teorijom (npr. Yoshino, 1976) odnosno (iii) tzv. „gap flow“ (strujanje u obliku protoka kroz planinske prijevoje kao što je Vratnik) koja se koristi za objašnjenje određenog broja opaženih slučajeva bure (Gohm i Mayr, 2006).

1.2.2. Koncept nastanka olujne bure

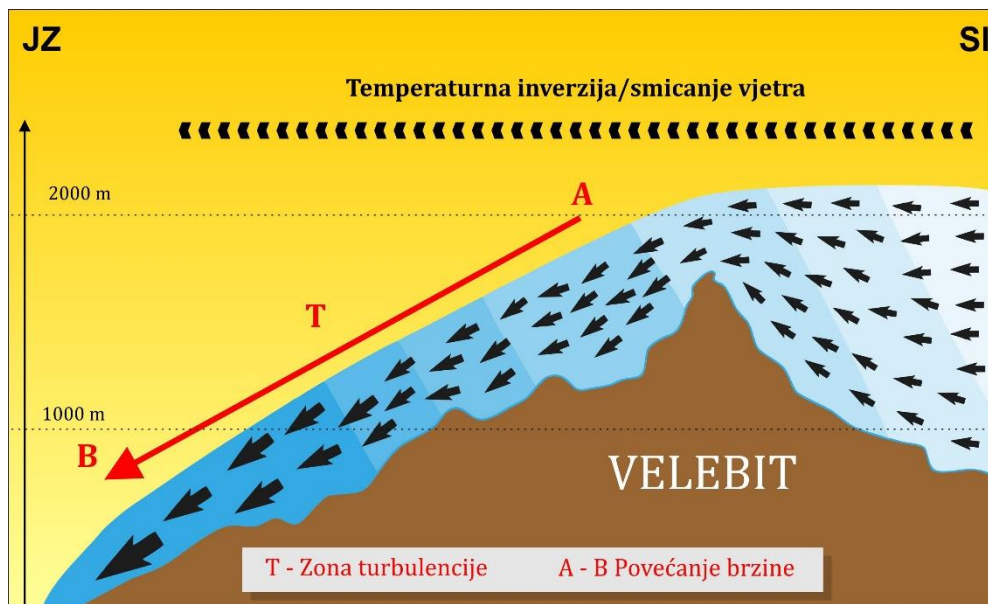
Promjene razumijevanju dinamike bure počele su nakon objavljivanja rezultata ALPEX (Alpine Experiment iz 1982. godine) projekta (Smith, 1987.). Prije ALPEX-a bura se opisivala kao katabatički vjetar, tj. tip težinskog strujanja (Yoshino, 1976). Ova teorija nije mogla u potpunosti objasniti veće brzine vjetra od 20 m/s niz padinu, zbog činjenice da je tada potrebna mjerena razlika u temperaturi od oko 25 °C (Egger, 1990; Grisogono i Oerlemans, 2001) koju ne bilježimo u praksi. Gruba aproksimacija brzine hladnog zraka, v , koji se spušta niz planinu dana je izrazom:

$$v = \sqrt{2gH \frac{T_2 - T_1}{T_2}} \quad (1.1.)$$

gdje je T_1 – temperatura ispred planine, T_2 – temperatura iza planine, H – visina prepreke, g – ubrzanje sile teže (9,81 m/s²). Drugi problem je visina maksimalne brzine vjetra, koja je uglavnom preniska u usporedbi s mjerenjima pri jakoj buri. Stari katabatički koncept bi se mogao primijeniti u slučaju kada bura nije jaka i ne širi se stotinama kilometara duž obale te kad počinje slabiti, obično u svojoj završnoj fazi. S druge strane, teorija linearnih valova bila je neprikladna za opisati buru jer je bilo nemoguće spojiti velike mezosklane gradijente tlaka s nelinearnošću strujanja zraka tj. velikim brzinama vjetra na bočnim stranama i istodobne stagnacije vjetra iznad planinskih vrhova.

Hidraulička teorija, uzima u obzir akceleraciju na gornjem dijelu strujanja i silaznu struju zraka, uvažava činjenicu da postoje jaki silazni udari bure (slika 2) nakon kojih slijedi stagnacija, ili obrnuti smjer vjetra u mješovitom sloju iznad zavjetrine. Nadalje, uvažava povećanje strujanja kod razdvajanja i cijepanje strujanja kao i brzo strujanje zraka niz padinu ispod mješovitog sloja zraka. Ključna razlika između katabatičke i hidrauličke teorije je da u osnovnim katabatičkim strujanjima hladni (teži) zrak nastaje lokalno zbog nedostatka zračenja na površini (Egger, 1990; Whiteman, 2000). Katabatičko strujanje može postići lokalnu ravnotežu u kojoj se

gubitak topline s površine uravnotežuje turbulentnim trenjem ili/i advekcijom. Takvu uravnoteženost ne nalazimo u slučaju kada puše bura. Dok se čest zraka u slučaju katabatičkog strujanja giba niz padinu zbog utjecaja sile teže, kod hidrauličkih strujanja utjecaj sile teže se zamjenjuje utjecajem gradijenta tlaka koji ubrzava čest zraka.



Slika 2. Shematski prikaz puhanja bure na području jadranske obale.

Hidraulička teorija je nastala kao konceptualni model kojim se može objasniti veliki spektar slučajeva jake bure. Kada bi je pojednostavili, hidraulična teorija nam govori da bura može puhati preko umjereno visokih planina (ne puno viših od 1000 m), tako da je protok zraka samo djelomično blokiran, dok se veliki strmi valovi pojavljuju iznad planine, strovaljuju se i na kraju razbijaju. Taj proces u mnogim slučajevima dovodi do formiranja hidrauličnog skoka u zavjetrinskom području s pratećim turbulencijama (Grisogono i Belušić, 2009).

Zaključno, prepreka transformira dolazno strujanje u jak vjetar u podnožju, koji puše na mahove i ima određene specifičnosti u zavjetrini. Pošto je visina planina stalna (H), bura će ovisiti o stratifikaciji (uvažavajući Brunt-Väisälä-inu frekvenciju; N) na uzlaznoj strani i strukturi srednje brzine vjeta okomitog na planinu (U), a opažene brzine se prema današnjim saznanjima mogu postići samo ako su zadovoljeni sljedeći uvjeti (pojedinačno ili više njih):

1. Postojanje kritičnog sloja induciranog lomljenjem valova što je moguće za bilo koje uzlazno strujanje (npr., kad je su konstantni profili N i U , a parametar nelinearnosti $U/(NH) < 1$).
2. Postojanje kritičnog nivoa niskog intenziteta na vrhu strujanja, što omogućava lom valova zbog nelinearnog pojačavanja širenja vertikalnih valova uzrokovanih uzgonom kako se približavaju kritičnom nivou (Smith *et al.*, 2007)

3. Postojanje temperaturne inverzije blizu vrha planine (Vosper, 2004)

1.2.3. Mohorovičićevo otkriće atmosferskih rotora

Andrija Mohorovičić je za vrijeme svoje profesure u Kraljevskoj nautičkoj školi Bakar započeo promatranje oblaka na području Kvarnera gdje je i opazio orografske oblake koji su nastali prilikom puhanja bure (Skoko i Mokrović, 1982). Mohorovičićevo zanimanje za oblake je proizašlo iz želje da doprinese općoj teoriji dinamike strujanja zraka u gornjim slojevima atmosfere i njenim relacijama s prizemnim strujanjem zraka. Pošto je živio u podnožju planina na sjevernom Jadranu gdje puše bura, dodatna motivacija mu je bilo objasniti dinamiku tog vjetrova (Grubišić i Orlić, 2007).

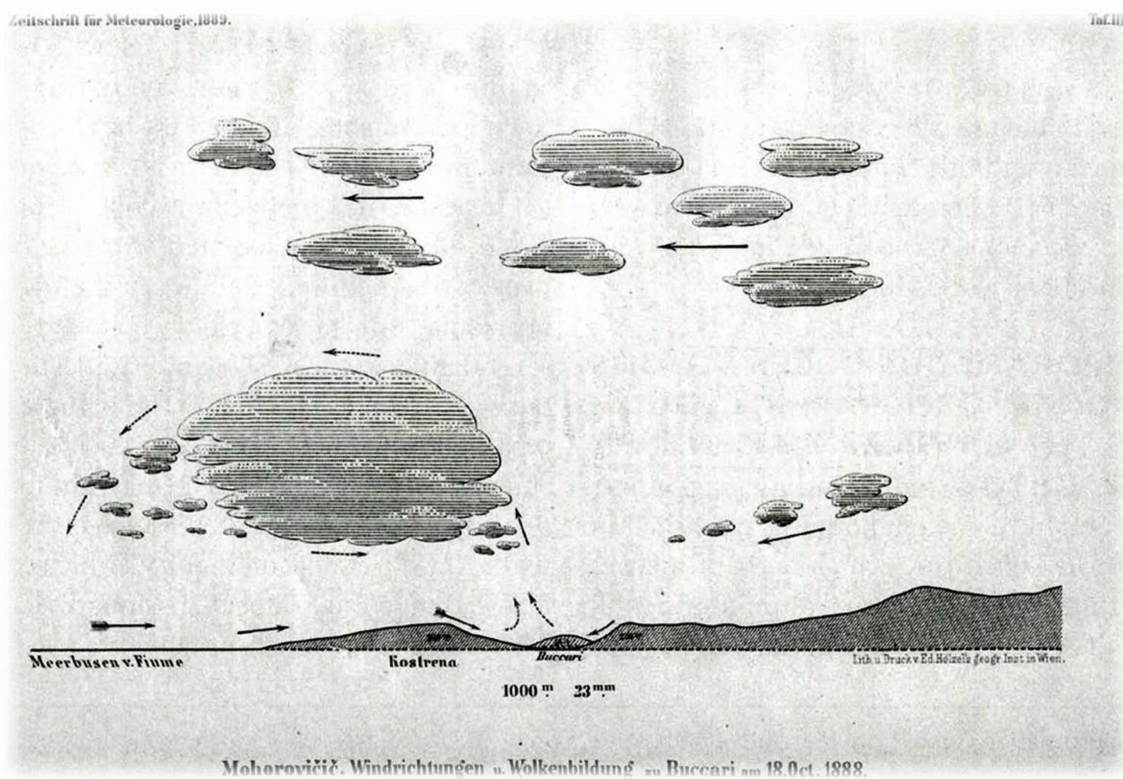


Slika 3. 3D prikaz Bakarskog zaljeva. (Google Earth, dostupno na: <https://earth.google.com/web/> [7. listopada 2019.]) Žuta linija prikazuje vertikalni presjek koji je prikazan na slici 4.

Mohorovičić je zajedno sa svojim kolegom A. M. Zuvičićem proučavao naoblaku i vrstu oblaka na satnoj bazi od 07:00 do 21:00 sat po lokalnom vremenu. Također je vršio mjerenja smjera i brzine gibanja oblaka i to 4 puta dnevno u 07:00 (08:00 po zimi), 10:00, 14:00 i 16:00 sati po lokalnom vremenu. Mjerenja je vršio uz pomoć nefoskopa², kojeg je konstruirao sam iz kamere opskure³ koja je bila u vlasništvu škole (Mohorovičić, 1888a). Mjerenja naoblake, vrste te smjera i brzine kretanja oblaka je vršio dvije godine, od 01. lipnja 1888. do 30. travnja 1890. U tom periodu je razvio metodu kvantitativne determinacije vertikalne komponente gibanja oblaka, gdje je za ulazne podatke uzimao svoja mjerenja (Mohorovičić, 1889b,c). Analiza i sažetak njegovih istraživanja bila je tema njegove doktorske disertacije, koju je uspješno obranio na Zagrebačkom sveučilištu 1893. godine.

² Nefoskop je bio instrument za mjerenje visine, smjera i brzine oblaka u 19. stoljeću.

³ Kamera opskura (tal. Camera obscura) je preteča foto aparata.



Slika 4. Oblaci i vjetar opaženi 18. listopada 1888. godine kako ih je prikazao Mohorovičić (1889a). Riječki zaljev je na lijevoj strani, a planine na desnoj. Pune strelice označavaju opaženi vjetar, crtkane strelice označavaju vjetar izveden dinamičkim putem.

Tijekom navedenog razdoblja u kojem je vršio mjerenja, opazio je i dokumentirao specijalnu vrstu stacionarnog kumulusa koji se ponekad formirao za vrijeme puhanja bure iznad Bakarskog zaljeva (slika 3). Jedan od najboljih primjera oblaka tog tipa se formirao 18. listopada 1888. godine (Mohorovičić, 1889a). Ključan dio njegovog istraživanja je dijagram opažanih oblaka s pratećom cirkulacijom zraka u vertikalnom presjeku preko Bakarskog zaljeva (slika 4). Vertikalni presjek je izrađen tako da je paralelan sa smjerom puhanja bure tog dana. Na dijagramu se vide tri glavne grupe oblaka⁴: 1. stacionarni kumulus kojem je početak baze nad bakarskim zaljevom, 2. fragmentirani stratokumulus koji se nalazi dalje i giba se jednoliko zajedno s jakim sjeveroistočnim strujanjem, 3. nekoliko manjih stratokumulusa koji se spuštaju niz obronke planine. Veliki stacionarni kumulus koji se formirao paralelno s planinom na desnoj obali „se proteže do kud seže pogled [u smjeru sjeverozapad – jugoistok]“⁵. Gusti debeli kumulus, oblak vrha bure, bio je također prisutan iznad planine (nije prikazan na slici 4, ali je objašnjen u drugom tekstu Mohorovičića (1891), s nešto vedrog neba kroz koji se mogu vidjeti cirusi koji su visoko između dvije linije oblaka stratokumulusa. Od otrgnutih vrhova i rubova oblačne kape iznad vrha planine, odvojili su se manji fragmenti koji su se spustili niz padinu planine. Iznad Bakra, blizu

⁴ Mohorovičić je koristio klasifikaciju oblaka koju je razvio Luke Howard (28. studeni 1772. – 21. ožujak 1864.)

⁵ Tekst pod navodnicima je prijevod originalnog teksta A. Mohorovičića

rubu baze stacionarnog kumulusa, manji kumulusi koji su se formirali na nižoj visini gibaju se brzo (procijenjene brzine od 15 do 16 m/s) prije nego su došli i stopili se sa stacionarnim kumulusom. Mohorovičić je zaključio da konstantno uzlazno strujanje vjetra uzrokuje stalno formiranje novih oblaka pri bazi stacionarnog kumulusa. Zadnja strana stacionarnog kumulusa je bila isto rascjepkana, a odvojeni mali oblačići brzo su nestajali. Na temelju opaženog, Mohorovičić je pretpostavio da postoji jako silazno strujanje pri kraju stacionarnog oblaka.

Mjerenja prizemnog vjetra tog dana su zabilježila jak zapadni-sjeverozapadni vjetar na području Riječkog zaljeva, dok je na području Bakra mjeren prizemno slab, varijabilni vjetar. Kako je na strani Kostrene Bakarskog zaljeva, opažen jednak vjetar onome u Riječkom zaljevu, Mohorovičić je zaključio da se iznad Bakarskog zaljeva stvorio veliki horizontalno orijentirani rotor. Opažena formacija oblaka se održala od jutarnjih sati do kasnog popodneva s kratkom stankom oko podneva. Mohorovičić je u svojem članku (1889a) zaključio:

„Nemoguće je zamisliti postojanje tako veliku stabilnu formaciju kumulusa ako ne pretpostavimo rotaciono strujanje zraka po horizontalnoj osi.“⁶

Mohorovičić je spekulirao da rotor nastaje zbog specifične orografije na području Bakarskog zaljeva te je skicirao cirkulaciju zraka koja izgleda kao atmosferski rotor (slika 4). Također je bio svjestan da veliki rotor po horizontalnoj osi nije svakidašnja atmosferska pojava. Mohorovičićev članak je bio interesantan uredniku časopisa Juliusu von Hannu, koji ga je objavio i još k tome i napisao prilog sa svojim komentarima na Mohorovičićeve opažanja, konstatirajući da su slična opažanja zabilježena u Južnoj Africi, Grenlandu i na sjeveru Ujedinjenog Kraljevstva.

1.2.4. Današnje spoznaje o atmosferskim rotorima

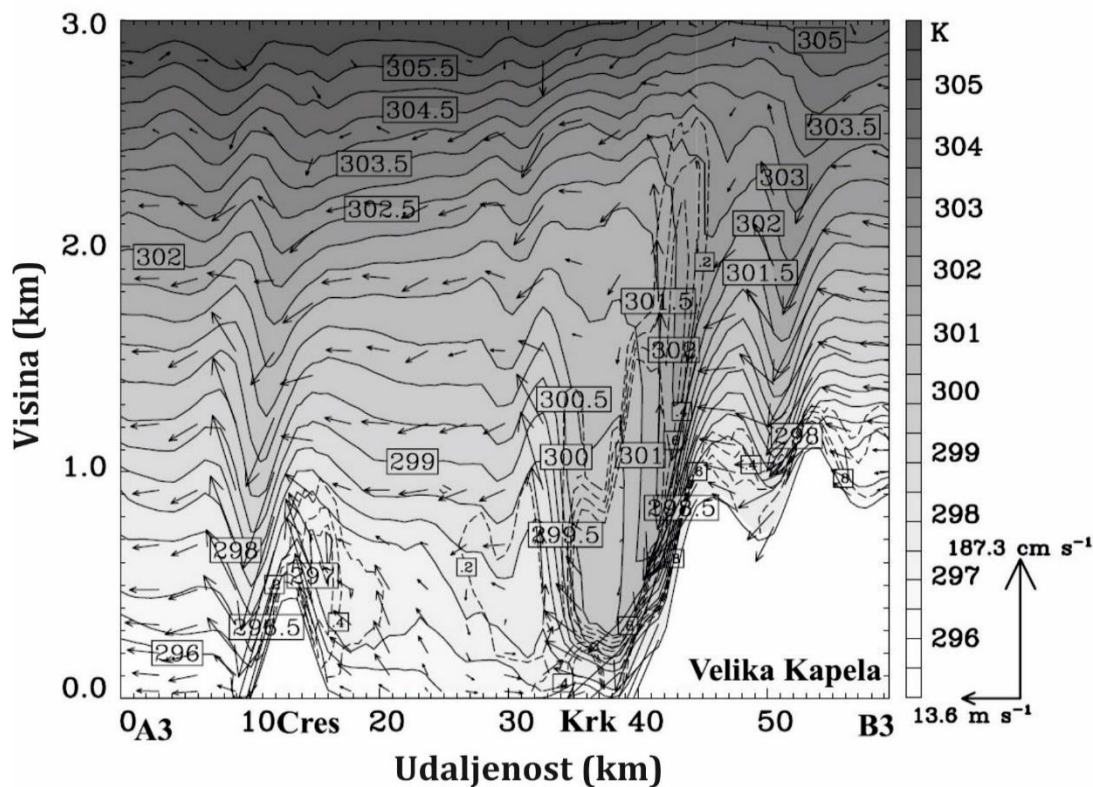
Rotori su snažni vodoravno usmjereni vrtlozi, povezani sa zavjetrinskim valovima i/ili hidrauličnim skokovima. U moderno vrijeme, atmosferski rotor na koje je uputio Mohorovičić, se još uvijek prikazuju kao dvodimenzionalno (2D) rotaciono gibanje koje nastaje ispod stacionarnih planinskih valova, u stabilnoj zračnoj struji koja prolazi preko planinskog grebena (Doyle i Durran, 2004).

Zängl i Hornsteiner (2007) su pokazali da jake zavjetrinske oluje mogu nastati uslijed zarobljenih zavjetrinskih valova, čime se stvaraju povoljni uvjeti za pojavu atmosferskih rotora. To znači da jaka bura i rotor mogu egzistirati u isto vrijeme. Atmosferski rotor koji se pojavljuje prilikom puhanja bure, proučavali su se i teorijski (pomoću modela različite kompleksnosti) i empirički.

Da bi se pojavio rotor, ključno je da na donjoj strani imamo podlogu bez velikog trenja te da postoji vertikalno smicanje horizontalnog vjetra koje je okomito na podlogu. Vosper (2004) je proučavao utjecaj temperaturne inverzije na nastanak

⁶ Slobodan prijevod originalnog teksta A. Mohorovičića

zavjetrinskih valova, zavjetrinskih rotora, slabih hidrauličkih skokova i pojava pucanja valova iznad površine zemlje. Nadalje, ukazao je na važnost donjeg rubnog uvjeta odnosno podloge bez trenja, koja dovodi do razdvajanja strujanja kod graničnog sloja ispod vrha vala. Takva situacija može imati za posljedicu, stvaranje zatvorenog rotora u zavjetrini.



Slika 5. Vertikalni presjek horizontalnog vjetara s prikazom potencijalne temperature (konture, interval 0.5 K) (iz Telišman Prtenjak et al., 2010). Na zavjetrini Velike Kapele stvara se hidraulički skok (vidljiv u polju potencijalne temperature kao zgusnute izololinije) te formiranju rotora te povratnog prizemnog strujanja prema planini nakon skoka (iznad otoka Krka).

Doyle i Duran (2002) su pokazali da se horizontalni atmosferski vrtlog formira odvajanjem graničnog sloja ispod planinskih zavjetrinskih valova zbog suprotnog gradijenta tlaka induciranog prvim grebenom vala. Doyle i Durran (2007) objašnjavaju da tako nastali rotori nisu baš koherentni i nemaju laminarnu strukturu, umjesto toga imaju ukomponirane podrotore. Hertenstein and Kuettner (2005) su prepoznali dva različita rotora koje nazivaju rotorom tipa 1 i 2. Rotor tipa 1 se formira ispod grebena zavjetrinskog vala uz prisustvo smicanja prema naprijed pri slaboj temperaturnoj inverziji. Kad je smicanje unutar sloja inverzije slabo, Hertenstein i Kuettner (2005) su pretpostavili da se formira rotor tipa 2, koji ima sličnosti s nestabilnim valom koji se lomi ili hidrauličnim skokom. Nadalje, numeričke simulacije Hertensteina i Kuettnera (2005) sugeriraju da je vertikalno i horizontalno strujanje vjetra te generiranje turbulencije najjače duž plohe vodoravne vrtložnosti, posebno na početku zavjetrinskog vala tj. početka rotora.

Čini se da velika razvedenost jadranske obale povoljno utječe na: razdvajanje strujanja u graničnom sloju (Gohm i Mayr, 2006; Telišman Prtenjak *et al.*, 2010), nagle promjene temperature po visini i na okomito smicanje vjetra, $\frac{dU}{dz} \gg 0$. U zadnjih 10-ak godina korišteni mezoskalni numerički modeli fine razlučivosti dali su indikacije za postojanje atmosferskih rotora na Jadranu (slika 5); oko otoka Krka (Telišman Prtenjak i Belušić, 2009; Telišman Prtenjak *et al.*, 2010) te oko Zadra (Stiperski *et al.*, 2012).

Na zapadnoj obali otoka Krka, numerička simulacija s mrežnim korakom od 1 km je pokazala da se tijekom ljetne frontalne bure i hidrauličkog skoka u zavjetrini Velike Kapele formirao plitki atmosferski rotor u blizini Malinske (Telišman Prtenjak i Belušić, 2009; Telišman Prtenjak *et al.*, 2010). Tada se uspostavilo nasuprotno strujanje buri nalik rotoru na području od 10 x 10 km s povratnim stujanjem u prvih 300 m u trajanju od nekoliko sati. Rotor je bio vezan uz pojavu stacionarnog zavjetrinskog hidrauličkog skoka što je u skladu s teorijom (Sheridana i Vosper, 2006) te je njegova prostorna pozicija također bila u skladu s položajem atmosferskih rotora koje je uočio Mohorovičić. Međutim, odsustvo jače prizemne mlazne struje i relativno niske vrijednosti turbulentne kinetičke energije unutar lokalne cirkulacije (do 0,5 m²/s²) su obilježja koja se ne poklapaju s 2-D idealiziranim prikazom rotora tipa 2 prema Hertenstein i Kuettneru (2005).

1.3. Cilj rada i motivacija

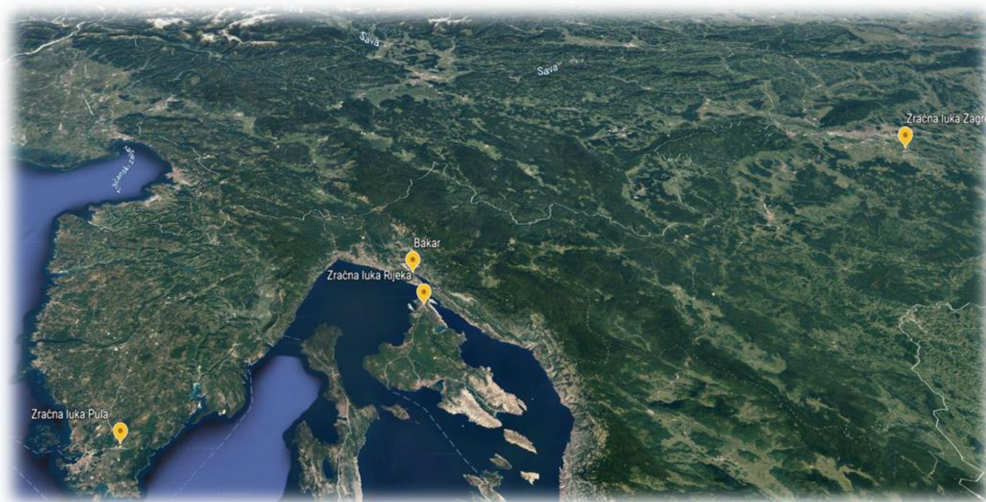
Rezultati (vrlo rijetkih) numeričkih studija iako otkrivaju detalje prostorne i vremenske strukture vrtložnog strujanja baziraju se na simulaciji jednog odabranog slučaja u Kvarnerskom zaljevu. Kako se dostupnost mjerenja u zadnjih 20-ak godina povećala, cilj je iskoristiti postojeća mjerenja za razvijanje algoritma kojim bi se pokušale pronaći strukture koje bi odgovarale atmosferskom rotoru. Dostupni nizovi meteoroloških podataka mogli bi dati neka nova klimatska obilježja ovog fenomena što bi svakako doprinijelo širenju saznanja o Mohorovičićevim rotorima, odnosno buri u Kvarnerskom zaljevu.

2. OBILJEŽJA PODRUČJA ISTRAŽIVANJA I KORIŠTENIH METODA

2.1. Opis područja istraživanja i mjerenja

Područje koje je obuhvaćeno ovim diplomskim radom su Primorsko-goranska i Istarska županija te grad Zagreb (slika 6). Različite lokacije su odabrane zbog nekoliko aspekata analize; (i) prostorna pojava Mohorovičićevih rotora bazira se na podacima iz Primorsko-goranske županije, (ii) mjerenja na području Istre su mjera pojave bure i njene prostorne raširenosti, a (iii) mjerenja iz Zagreba dat će nam meteorološku sliku zračne mase/struje koja dolazi do prepreke.

Primorsko – goranskom županijom dominira Kvarnerski zaljev s razvijenom obalom i mnogim otocima. Na području Kvarnera nalaze se četiri velika otoka: Krk, Rab, Cres i Lošinj te devet manjih: Susak, Unije, Ilovik, Košljun, Goli Otok, Plavnik, Male i Vele Srakane. Jedna od većih uvala je Bakarski zaljev, gdje je i Andrija Mohorovičić opazio rotor. Pored navedene, slične uvale se mogu naći i na otocima, kao što je uvala Punat na Krku te Valunski zaljev na Cresu. Na području Kvarnera nalazi se najveća hrvatska pomorska luka Rijeka te Zračna luka Rijeka (ZL Rijeka) koja je smještena na otoku Krku (slika 6).



Slika 6. Područje istraživanja s lokacijama spomenutima u tekstu. (Google Earth, dostupno na: <https://earth.google.com/web/> [10. studenog 2019.]

Pošto na području Bakra postoji samo klimatološka postaja koja je smještena u samom Bakru, mjerenja na toj poziciji nam nisu dovoljno česta⁷ (DHMZ, dostupno na: https://meteo.hr/infrastruktura.php?section=mreze_postaja¶m=pmm&el=klimatoloske [9. studenog 2019.]) niti su na dobroj lokaciji jer prema Mohorovičiću na tom mjestu je opaženo prizemno strujanje u smjeru bure (slika 4). Važno je napomenuti da je lokacija postaje ZL Rijeka udaljena oko 10,2 km od mjesta na kojem je Mohorovičić vršio svoja promatranja. U skladu s Mohorovičićevim procjenama prostornih

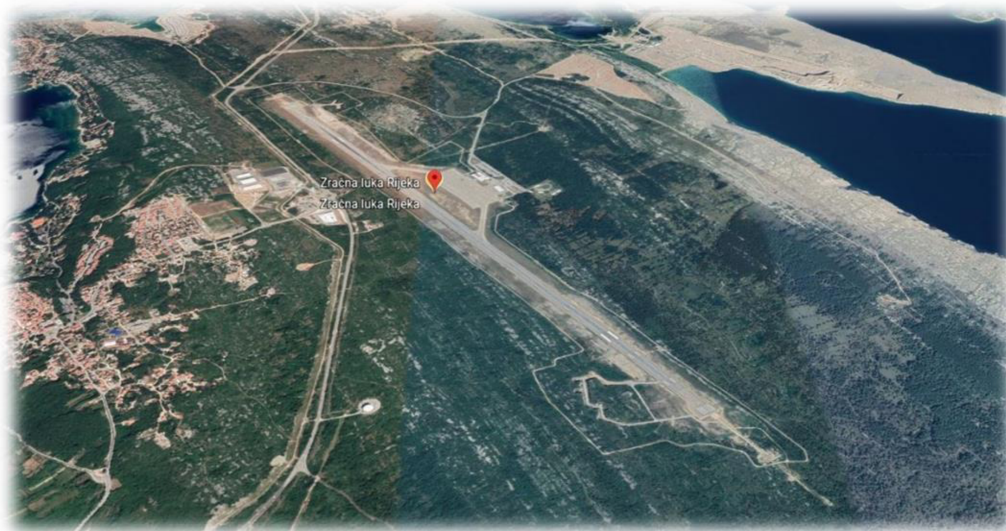
⁷ Prema Mohorovičiću rotor je trajao od ranih jutarnjih sati do popodneva, s stankom oko podneva (vidi poglavlje 2.2.), pošto se mjerenja u Bakru vrše u 7:00, 14:00 i 21:00 sati postoji prevelika vjerojatnost da se Mohorovičićev rotor ne zabilježi iako se pojavio taj dan.

dimenzija velikog stacionarnog kumulusa koji se ...formirao paralelno s planinom na desnoj obali te se protezao do kud seže pogled..., ovdje se kreće od pretpostavke da se rotor formira i iznad postaje ZL Rijeka (slika 6). Očekuje se također da jugozapadno prizemno strujanje za vrijeme puhanja bure bude mjera pojave rotora. Gustoća zabilježenih meteoroloških podataka iznosi svakih pola sata te potencijalno omogućava selekciju atmosferskih (Mohorovičićevih) rotora iz vremenskih nizova podataka.

Zbog spomenute gustoće zabilježenih podataka analiza se bazira na mjerenjima s tri odabrane postaje (slika 6) iz razdoblja od 01. siječnja 2005., 00:00 sati do 30. travnja 2019. 23:00 UTC:

- S mjerne postaje ZL Rijeka koja se nalazi na geografskoj širini $\Phi = 45,219598^\circ$ N, dužini $\lambda = 14,571743^\circ$ E. Nadmorska visina lokacije je 85 m.
- S mjerne postaje Zračna luka Pula (ZL Pula) koja se nalazi na geografskoj širini $\Phi = 44,897245^\circ$ N, dužini $\lambda = 13,920937^\circ$ E. Nadmorska visina lokacije je 63,3 m.
- S mjerne postaje Zračna luka Zagreb (ZL Zagreb) koja se nalazi na geografskoj širini $\Phi = 45,729270^\circ$ N, dužini $\lambda = 16,053922^\circ$ E. Nadmorska visina lokacije je 108 m.

Udaljenost ZL Zagreb od ZL Rijeka je oko 130 km, a do ZL Pula je oko 192 km.



Slika 7. Lokacija uzletno-sletne staze na Zračnoj luci Rijeka. (Google Earth, dostupno na: <https://earth.google.com/web/> [16. studenog 2019.])

ZL Rijeka (slika 7) je izgrađena na otoku Krku te je započela s radom 1970. godine. Uzletno-sletna staza (kodne oznake 4E) usmjerena je u smjeru $143^\circ / 323^\circ$. Postavljeni anemometar i vjetrulja dobiveni iz sustava na slici 8 pomoću kojega se dobivaju podaci o vjetru, prvotno se nalazio uz ravni dio uzletno-sletne staze na visini od 8.5 m. Kasnije je instrument preseljen 45 m južnije od prvotne pozicije na visinu od

10 m u odnosu na uzletno-sletnu stazu. Položaj i tip mjerenja se nije mijenjao za razdoblje analize.



Slika 8. Anemometar Vaisala WAA151 i vjetrovulja Vaisala WAV151 na stupu.

ZL Pula (slika 9) smještena je nedaleko grada Pule na području Istarske županije u smjeru istok-sjeveroistok na Valturskom polju. Uzletno-sletna staza usmjerena je u smjeru $90^{\circ}/270^{\circ}$. Vjetrovulje i anemometar se nalaze pored sredine uzletno-sletne staze.



Slika 9. Lokacija uzletno-sletne staze na Zračnoj luci Pula. (Google Earth, dostupno na: <https://earth.google.com/web/> [17. studenog 2019.])

Nakon Drugog svjetskog rata, da bi se zadovoljili zahtjevi modernog zračnog prometa i na inicijativu "Uprave za civilno zrakoplovstvo", u blizini Zagreba, na lokaciji Pleso započinje gradnja ZL Zagreb. U jesen 1959. godine, zračna luka je otvorena za civilno zrakoplovstvo, a 1966. obnovljena je i povećana uzletno-sletna staza (slika 10) i platforma. Uzletno-sletna staza usmjerena je u smjeru $50^{\circ}/230^{\circ}$, a anemometar i vjetrovulja nalaze se južno od uzletno-sletne staze. Od 2005. tip mjernih instrumenata i njihova lokacija nisu se mijenjali do danas.



Slika 10. Lokacija uzletno-sletne staze na Zračnoj luci Zagreb. (Google Earth, dostupno na: <https://earth.google.com/web/> [16. studenog 2019.])

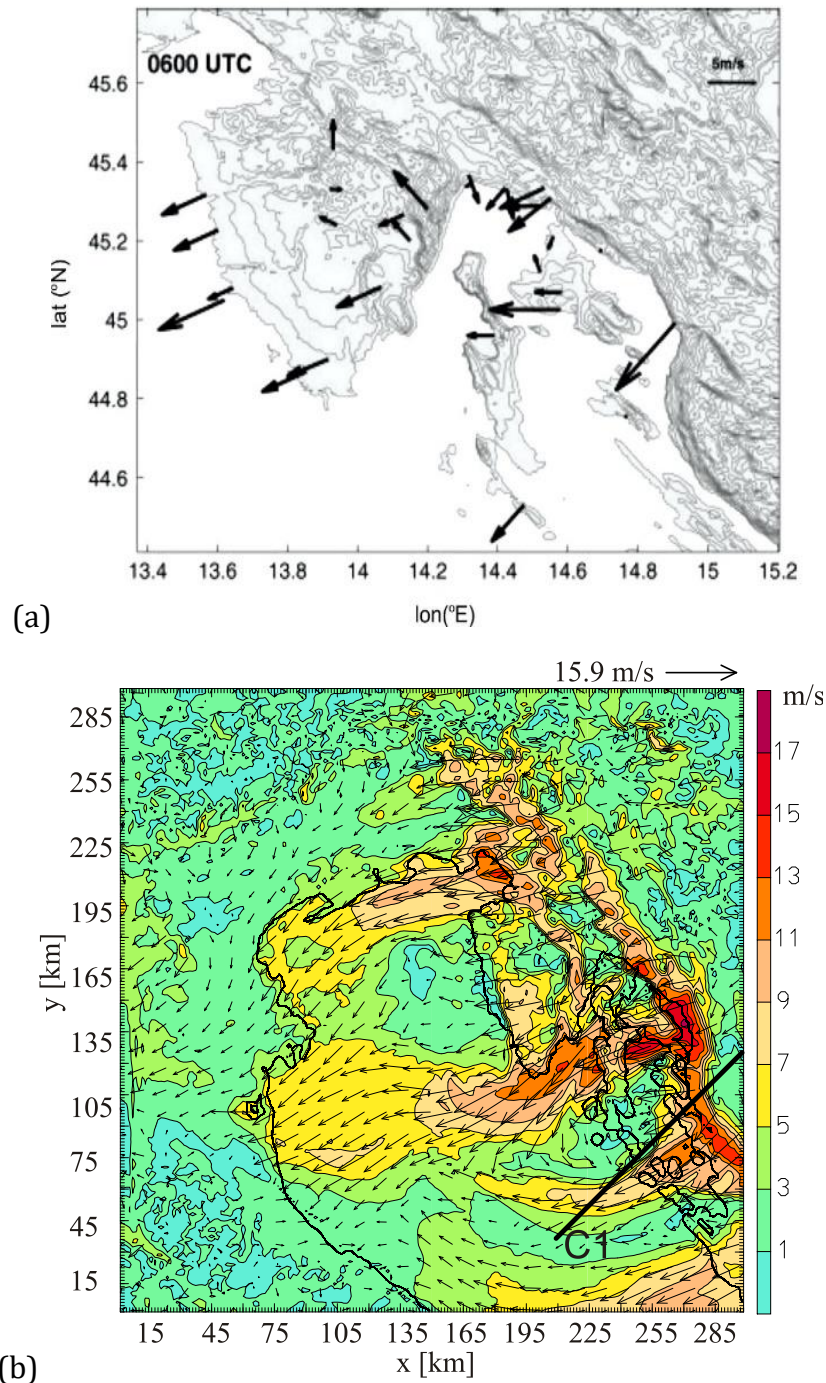
Sva mjerenja koja se koriste u ovom diplomskom radu ustupila je Hrvatska kontrola zračne plovidbe d.o.o. (dalje u tekstu: HKZP). Bazu podataka čine 15 godina mjerenja različitih parametara na tri lokacije, što nas dovodi do dosta velike baze podataka koje je bilo potrebno analizirati. Na lokacijama ZL Pula i ZL Zagreb mjerenja su vršena u intervalima od pola sata pokrivajući 24-satni period, dok na mjernoj postaji u ZL Rijeka ukupan broj dostupnim mjerenja smanjen na razdoblja kad ima letova. Mjerenja su zabilježena u METAR izvješćima⁸.

2.2. Obilježja bure nad područjem Kvarnera

Bura na području Kvarnera ne puše jednoliko već ima određena prostorna obilježja i varijacije (npr. Grubišić, 2004; Telišman Prtenjak *et al.*, 2010, 2015; Kuzmić *et al.*, 2013). Prostorno-vremenske promjene pokazuju i analiza mjerenja (npr. slika 11a) i analiza numeričkih simulacija (slika 11b) visoke razlučivosti. Simulirano prizemno polje vjetra tijekom bure (slika 11b) mijenja se po brzini vjetra sjeverno i južno od Istre. Planinski prijevoji uzrokuju stvaranje mlazova bure (područja povećanih brzina). Gledajući od sjevera prema jugu, sjeverni mlaz bure se stvara u blizini Trsta i Kopra između Julijanskih Alpi i Dinarida. Južni mlazovi bure su povezani s planinskim usjecima Gornje Jelenje koji zahvaća gornji dio otoka Cres širine 15 km te s Vratnikom gdje se stvara područje povećanih brzina. Ova južnija zona povećanih brzina postiže svoj maksimum unutar Senjskih vrata⁹ i uz istočnu obalu otoka Cresa širine oko 25 km. Oba uska mlaza iznad Kvarnera se združuju tvoreći jedan široki pojas povećanih brzina koji se proteže od sredine Istre do otoka Lošinja, sa središtem iznad

⁸ Detalji o strukturi METAR formata mogu se naći u Prilogu A ovog rada.

⁹ Senjska vrata su morski prolaz između otoka Krka i otoka Prvića. Prolaz je širok približno 1 km i dubok do 60 m.



Slika 11. (a) Izmjereni i (b) simulirani vjetar na 10 m iznad tla na meteorološkim i klimatološkim postajama za 29. lipnja 2004. u ranim jutranjim satima (iz Telišman Prtenjak *et al.*, 2010, 2015) tijekom jedne epizode frontalne bure.

vrha istarskog poluotoka. Simulirana polje vjetra otkriva zaklonjena područja kao što su zapadni dio Riječkog zaljeva, posebno oko grada Opatije odnosno sjeverozapadna obala otoka Krka oko grada Malinske te južni dio otoka Raba. Budući da bura obično slabi tijekom dana zbog razvoja (konvektivnog) atmosferskog graničnog sloja (Grisogono i Belušić, 2009), bura ima smanjenje brzine vjetra i na zapadnoj obali Istre.

2.3. Kriteriji odabira rotora

Na temelju dosadašnjih analiza prostorne raspodjele prizemnog vjetra, područje Pule može se smatrati reprezentativnim područjem za detekciju bure za područje Kvarnera (Bajić, 1989; Telišman Prtenjak *et al.*, 2010, 2015). S obzirom da jedinstvena definicija bure ne postoji, bura je u ovom radu definirana kao vjetar definiran smjerom iz prvog kvadranta u intervalu između 22° i 68° .

Prema Mohorovičićevom istraživanju (vidi poglavlje 2.2.) u Rijeci je za vrijeme manifestacije rotora na području Bakarskog zaljeva puhala jaka bura. Pretpostavka je da tijekom puhanja bure u ZL Pula, te u slučaju nasuprotnog strujanja u u ZL Rijeka, postoji mogućnost formiranja Mohorovičićevoga rotora iznad Bakarskog zaljeva. Nadalje je uočeno da u slučaju bure, tlak zraka izmjeren na mjernoj postaji ZL Zagreb, mora biti viši od onoga izmjerenog u ZL Rijeka i ZL Pula (vidi poglavlje 3.3.). Stoga da bi se stvorili preduvjeti za postojanje Mohorovičićevog rotora pretpostavka je da nam mjerenja moraju pokazati sljedeće:

1. Na području cijelog Kvarnerskog zaljeva izmjeren je tlak niži od onog u ZL Zagreb;
2. Na području ZL Pula izmjeren je jak vjetar s udarima koji može puhati iz prvog kvadranta (22° - 68°);
3. Na području ZL Rijeka izmjeren je slab vjetar koji puše iz trećeg kvadranta (180° - 270°).

U slučaju da su zadovoljeni svi uvjeti možemo pretpostaviti da se formirao Mohorovičićev rotor.

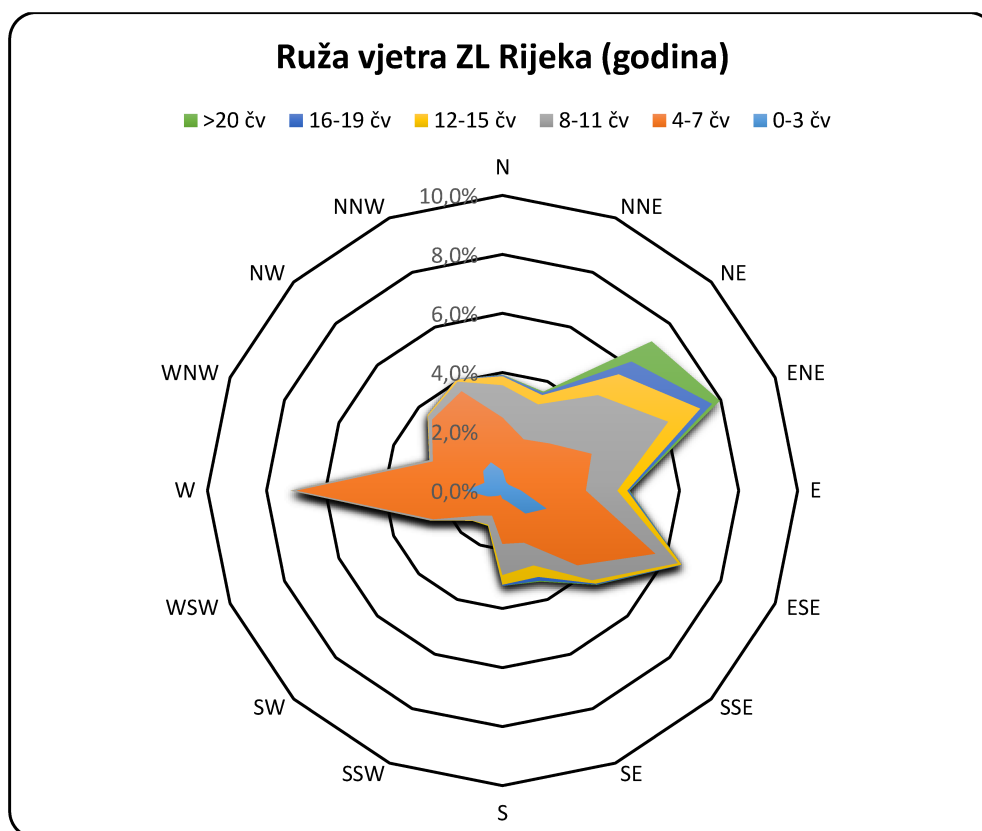
Dodatni potvrdni kriterij formiranja rotora radio se subjektivno, provjerom odabranih termina pomoću analize fotografija neba iznad ZL Rijeka na taj dan.

3. KLIMATOLOŠKA OBILJEŽJA ISTRAŽIVANIH LOKACIJA

3.1. Zračna luka Rijeka

Analiza METAR podataka od 01. siječnja 2005. do 30. travnja 2019. (vidi tablicu 1) dala je razdiobu i učestalost smjera i brzine vjetra na području ZL Rijeka. Iz analize su izdvojeni termini s varijabilnim smjerom vjetra prema METAR izvješću (prilog A) koji nisu mogli biti uvaženi u analizi. Tada je varijabilnost smjera vjetra velika te se taj podatak ne registrira u sustavu. Njihov udio je oko 30%.

Prema podacima dominira vjetar iz tri smjera; bura u prvom kvadrantu odgovaraju smjeru sjeveroistok i istok-sjeveroistok (45° - 68°). Najjača bura, prema mjerenjima zabilježena je 26. veljače 2018. godine. Na taj dan je izmjerena prosječna srednja brzina vjetra od 41 čvora ($20,5 \text{ m/s} \sim 74 \text{ km/h}$) s udarima vjetra od 64 čvora ($32 \text{ m/s} \sim 230 \text{ km/h}$).



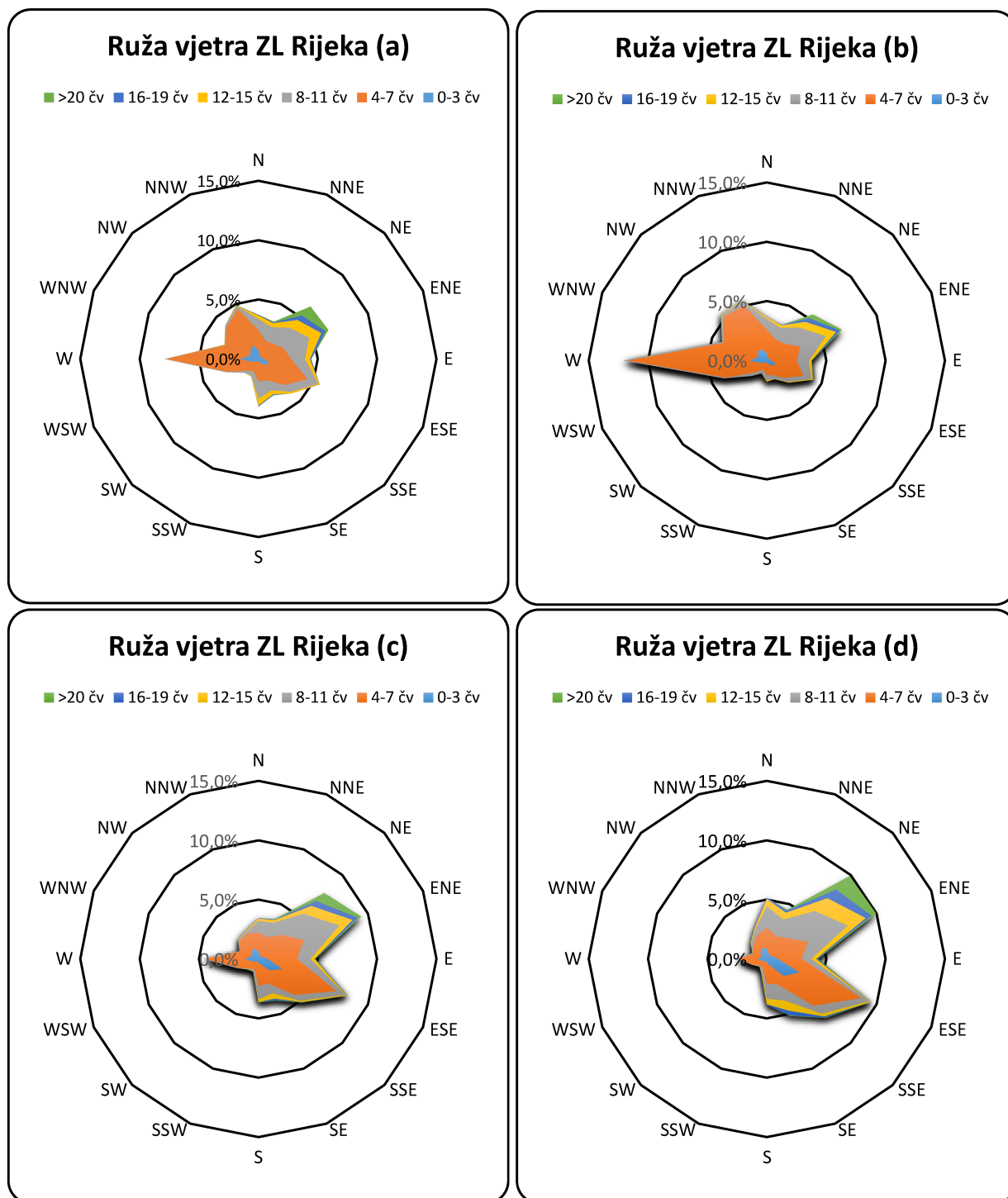
Slika 12. Godišnja ruža vjetra (u čvorovima) na 10 m iznad tla za Zračnu luku Rijeka u razdoblju 01. siječnja 2005. do 30. travnja 2019. dobivene na temelju METAR izvješća. Iz analize su izdvojeni termini s varijabilnim smjerom vjetra prema METAR izvješću (prilog A) koji nisu mogli biti uvaženi u analizi. Njihov udio je 32,4%. 1 čvor = $0,5144 \text{ m/s}$.

Obilježja atmosferskih ("Mohorovičićevih") rotora na Kvarneru

Tablica 1. Učestalost vjetra za sve tri postaje ZL Rijeka, ZL Pula i ZL Zagreb u razdoblju od 01. siječnja 2005. do 30. travnja 2019. Iz analize su izdvojeni termini s varijabilnim smjerom vjetra prema METAR izvješću (prilog A) koji nisu mogli biti uvaženi u analizi. Njihov udio je oko 30%. Istaknute vrijednosti odgovaraju maksimalnim vrijednostima za određenu kombinaciju brzine i smjera vjetra. 1 čvor = 0.5144 m/s.

Brzina vjetra ZL Rijeka	Smjer vjetra ZL Rijeka – udio vjetra varijabilnog smjera 32,40%															
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SSE	SE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
0-3 čv	0,681%	0,311%	0,279%	0,353%	0,630%	1,606%	1,097%	0,380%	0,280%	0,154%	0,249%	0,516%	1,246%	0,661%	0,927%	1,027%
4-7 čv	1,784%	1,565%	1,977%	2,904%	2,193%	3,991%	2,482%	1,526%	1,528%	0,768%	0,956%	2,023%	5,716%	1,894%	2,451%	2,611%
8-11 čv	1,102%	1,277%	2,314%	2,813%	1,062%	0,824%	0,714%	0,838%	1,054%	0,323%	0,228%	0,100%	0,199%	0,115%	0,187%	0,349%
12-15 čv	0,297%	0,345%	0,993%	1,174%	0,327%	0,138%	0,166%	0,420%	0,327%	0,045%	0,018%	0,012%	0,010%	0,014%	0,034%	0,079%
16-19 čv	0,050%	0,080%	0,613%	0,432%	0,072%	0,016%	0,044%	0,144%	0,042%	0,001%	0,001%	0,001%	0,001%	0,004%	0,000%	0,018%
>20 čv	0,007%	0,047%	0,966%	0,291%	0,024%	0,001%	0,014%	0,029%	0,001%	0,001%	0,000%	0,001%	0,000%	0,002%	0,001%	0,002%
Brzina vjetra ZL Pula	Smjer vjetra ZL Pula – udio vjetra varijabilnog smjera 25,31%															
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SSE	SE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
0-3 čv	0,158%	0,180%	0,346%	0,603%	0,380%	0,116%	0,081%	0,049%	0,062%	0,044%	0,061%	0,062%	0,123%	0,065%	0,068%	0,074%
4-7 čv	1,973%	4,177%	5,650%	5,556%	9,651%	3,179%	2,277%	1,298%	1,179%	0,862%	1,375%	1,598%	3,326%	1,134%	0,677%	0,570%
8-11 čv	0,126%	0,608%	3,134%	3,581%	3,400%	0,713%	0,836%	0,415%	0,229%	0,178%	0,296%	0,479%	2,063%	0,587%	0,172%	0,097%
12-15 čv	0,020%	0,117%	1,285%	2,947%	1,116%	0,073%	0,176%	0,051%	0,011%	0,025%	0,033%	0,078%	0,297%	0,103%	0,031%	0,012%
16-19 čv	0,006%	0,029%	0,533%	1,747%	0,415%	0,007%	0,014%	0,001%	0,000%	0,001%	0,004%	0,012%	0,021%	0,017%	0,005%	0,002%
>20 čv	0,003%	0,010%	0,250%	1,165%	0,194%	0,002%	0,001%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,002%	0,005%	0,002%	0,002%	0,000%
Brzina vjetra ZL Zagreb	Smjer vjetra ZL Zagreb – udio vjetra varijabilnog smjera 34,05%															
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SSE	SE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
0-3 čv	0,944%	1,285%	1,050%	1,006%	1,688%	1,143%	0,545%	0,341%	0,966%	1,832%	3,310%	3,603%	2,143%	0,477%	0,349%	0,344%
4-7 čv	1,059%	3,062%	4,427%	2,904%	2,410%	1,445%	0,635%	0,276%	0,894%	1,812%	3,561%	4,681%	2,842%	0,485%	0,261%	0,262%
8-11 čv	0,449%	1,613%	2,399%	0,619%	0,179%	0,088%	0,030%	0,012%	0,159%	0,467%	1,274%	0,920%	0,516%	0,146%	0,073%	0,078%
12-15 čv	0,195%	0,867%	0,891%	0,055%	0,007%	0,004%	0,002%	0,001%	0,043%	0,130%	0,596%	0,428%	0,086%	0,033%	0,026%	0,035%
16-19 čv	0,101%	0,385%	0,249%	0,006%	0,001%	0,000%	0,000%	0,000%	0,018%	0,028%	0,179%	0,141%	0,027%	0,010%	0,008%	0,012%
>20 čv	0,036%	0,036%	0,021%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,010%	0,007%	0,069%	0,095%	0,010%	0,009%	0,010%	0,012%

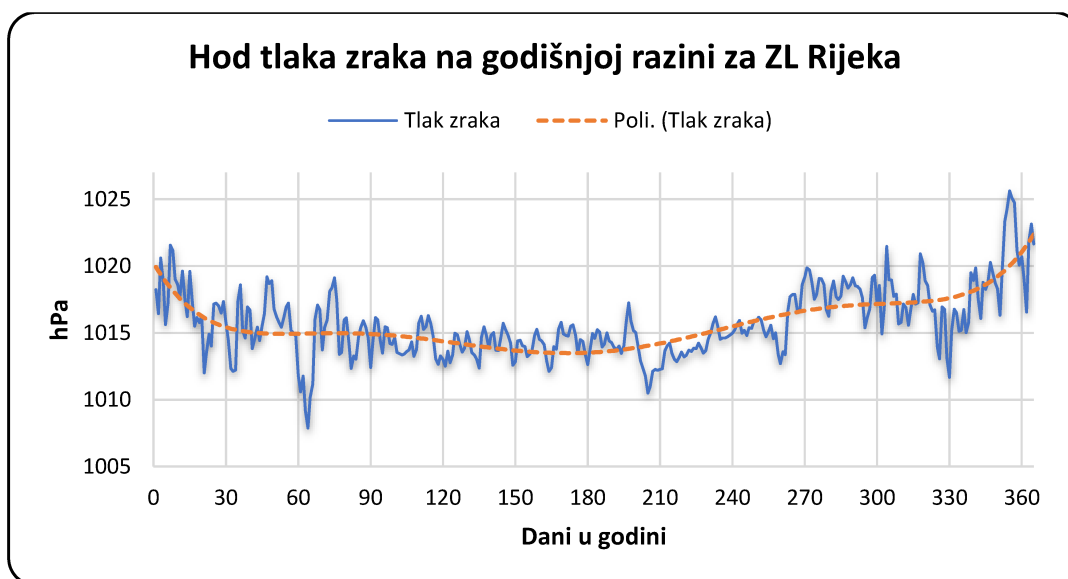
Iz ruže vjetra koja prikazuje puhanje vjetra na godišnjoj razini (slika 12, tablica 1) je vidljiva dominacija jakog vjetra iz smjera istok-sjeveroistok. U promatranom razdoblju, bura jača od 20 čvorova je puhala 36,6 dana (877,5 sati).



Slika 13. Tromjesečne (sezonske) ruže vjetra (u čvorovima) na 10 m iznad tla za Zračnu luku Rijeka u razdoblju 01. siječnja 2005. do 30. travnja 2019. dobivene na temelju METAR izvješća bez termina s varijabilnim smjerom vjetra; (a) ožujak-svibanj, (b) lipanj-kolovoz, (c) rujun-studenj, (d) prosinac – veljača. 1 čvor = 0,5144 m/s.

Vjetar slabijeg intenziteta puše s istoka i jugoistoka (jugo) dok je najslabiji iz smjera zapada. U promatranom periodu, vjetar južnog smjera je puhao 55,13 dana, dok je južni vjetar jači od 20 čvorova zabilježen rijetko (33 sata).

Analiza ruže vjetra po tromjesečjima (slika 13) i dalje pokazuje dominaciju tri osnovna smjera, sjeveristoka, jugoistoka i zapada. Sezonske razlike se uočavaju kod veće učestalosti bure na području ZL Rijeka tijekom klimatoloških razdoblja; proljeća (slika 13a) i zime (slika 13d). U istom razdoblju puše češće i snažnije vjetar iz smjera istok-jugoistok (jugo). Tijekom zime puše i jako jugo (prelazeći 20 čvorova, tablica 1). Proljetna i ljetna sezona (slika 13a i b) otkrivaju pojavu jačeg/češćeg strujanja iz smjera zapada. Prema analizama mjerenja tada je udio obalne cirkulacije relativno velik (u 50% ljetnih dana) što doprinosi stvaranju plitkog prizemnog vrtložnog strujanja unutar Riječkog zaljeva (u smjeru kazaljke na satu) te stvaranju prizemne zone konvergencije u polju strujanja nad otokom Krkom (Telišman Prtenjak *et al.*, 2006). Oba procesa su periodička na dnevnoj skali. Prema dobivenim ružama vjetra za selektirane dane sa smorcem unutar 24-h često se pojavljuje vjetar zapadnog smjera (W-NW) tijekom dnevnih termina (Telišman Prtenjak i Grisogono, 2007). Iako rijede nego u hladnom dijelu godine, bura se javlja i ljeti. U promatranom razdoblju, tijekom ljeta, bura jača od 10 m/s je puhala samo 114 sati, tj. njena učestalost je bila 6,04 ‰.



Slika 14. Godišnji hod tlaka zraka (hPa) reduciranoga na normalni nivo za Zračnu luku Rijeka za razdoblje od 01. siječnja 2005. do 30. travnja 2019.

Pomoću podataka o tlaku zraka može se provjeriti jesu li na području ZL Rijeka i ZL Pula tlakovi ujednačeni. Tlak može biti indikator puše li bura, odnosno je li se formirala depresija u polju tlaka na području Kvarnerskog zaljeva. Pri tome iznad Zagreba očekujemo područje povišenog tlaka.

Slika 14 pokazuje godišnji hod srednjih dnevnih vrijednosti tlaka normaliziranih na razinu mora u posljednjih 15 godina za ZL Rijeka. Srednje vrijednosti tlaka dobivene su na temelju reduciranog broja mjerenja u tijeku 24 sata do 2019.

godine. Tada su bile dostupne vrijednosti svakih pola sata, većinom od 7:00 do 18:30 UTC. Od 2019., tlak zraka se mjeri svakih pola sata cijeli dan.

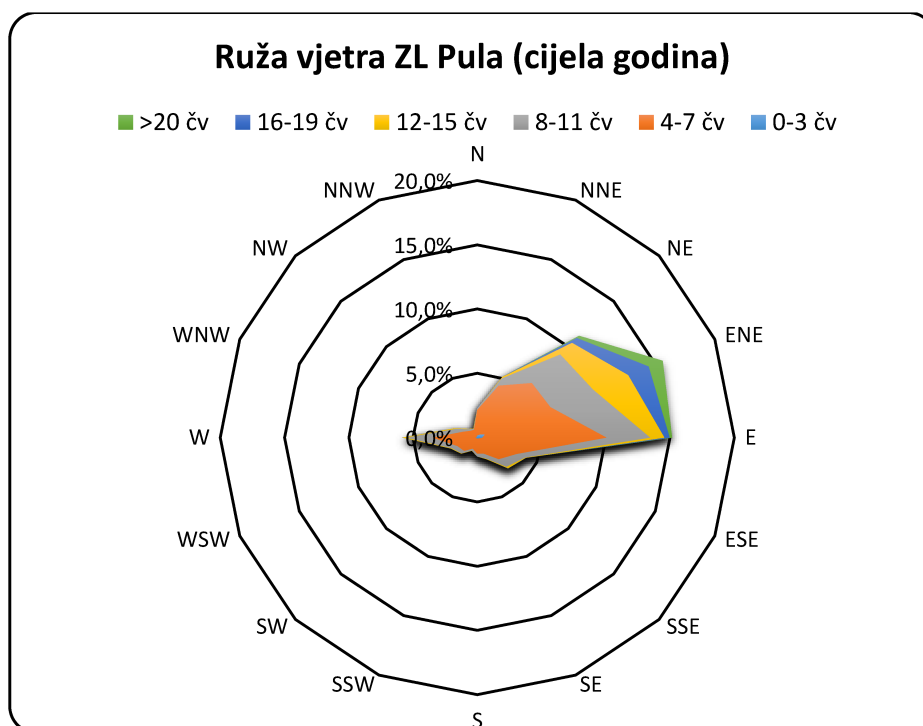
Najniži tlak zraka u promatranom razdoblju je izmjeren 30. siječnja 2015. godine i iznosio je 973 hPa. Dok je najveća vrijednost tlaka zraka, od 1,044 hPa, izmjerena 17. veljače 2008. godine. Radi lakšeg analiziranja hoda tlaka zraka na slici je prikazan i trend hoda tlaka zraka (narančasta isprekidana linija) koji smo dobili prilagodbom polinoma 6. reda na mjerene podatke. Jednadžba polina glasi:

$$y = 8 \cdot 10^{-13}x^6 - 9 \cdot 10^{-10}x^5 + 4 \cdot 10^{-7}x^4 - 7 \cdot 10^{-5}x^3 + 0.0068x^2 - 0.3113x + 1020.2$$

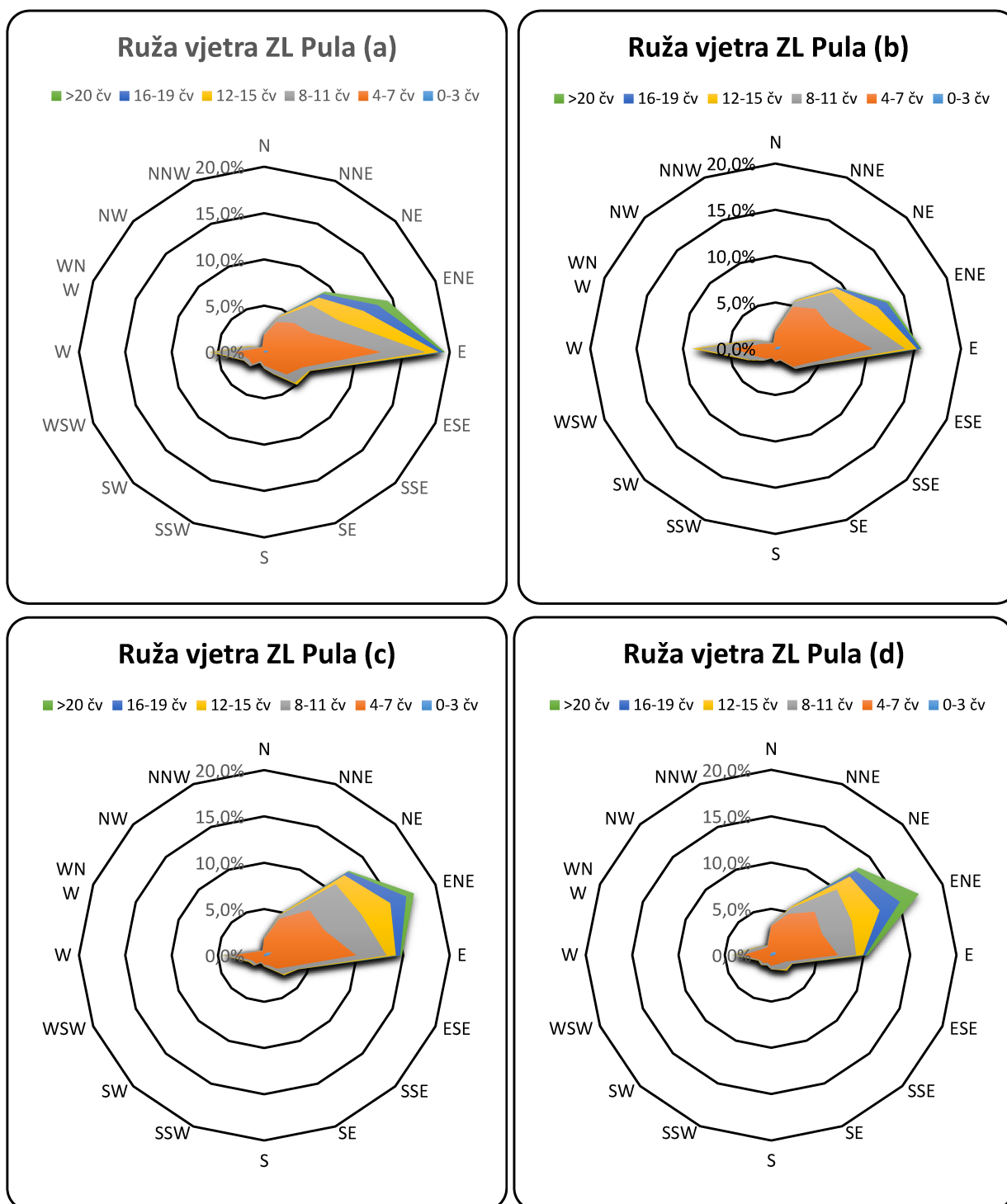
Trend pokazuje da se u prosjeku veće vrijednosti tlaka zraka javljaju tijekom zime (u slučaju hladnije atmosfere), dok se po ljeti mogu očekivati niže vrijednosti (zbog zagrijavanja same podloge u toplijem dijelu godine). Osim toga, može se vidjeti i manje varijacije u polju tlaka, one u ožujku, srpnju i studenom. Promjene tlaka od mjeseca do mjeseca se uglavnom poklapaju s mjesečnim promjenama za razdoblje 1960.-1990. koje su ukazale na smanjenje tlaka u travnju (proljeće) i studenom (jesen) kao signali pojačane ciklonalne aktivnosti nad Jadranom (Penzar *et al.*, 2001).

3.2. Zračna luka Pula

Dosadašnje numeričke simulacije daju naslutiti sličnost režima vjetra između postaja ZL Pula i ZL Rijeka kod puhanja bure (tablica 1 te usporedba slika 13 i 15).



Slika 15. Godišnja ruža vjetra (u čvorovima) na 10 m iznad tla za vjetar koji ne uključuje podatke s varijabilnim smjerom u Zračnoj luci Pula u razdoblju 01. siječnja 2005. do 30. travnja 2019. dobivene na temelju METAR izvješća. 1 čvor = 0,5144 m/s.



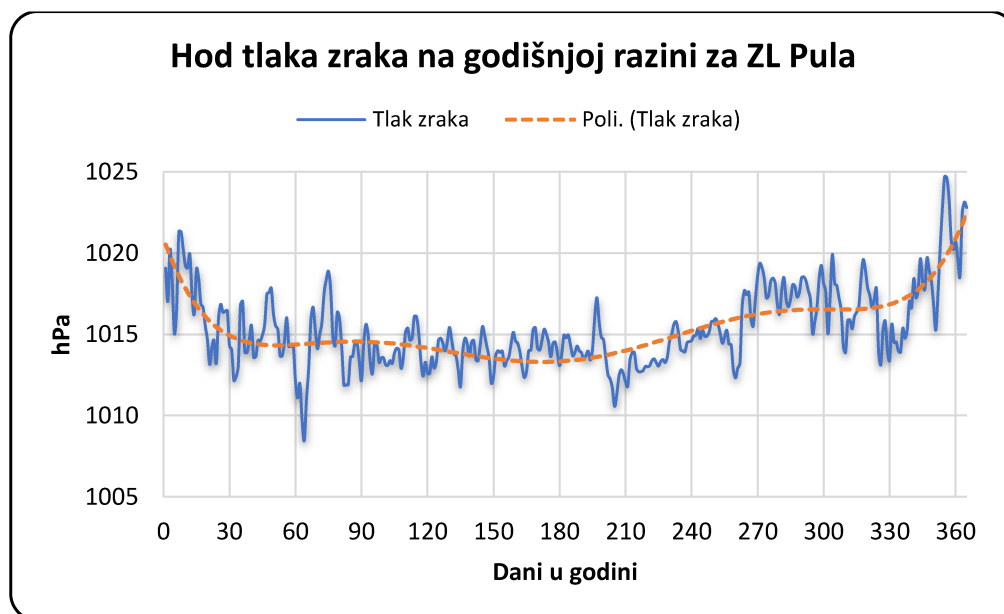
Slika 16. Tromjesečne (sezonske) ruže vjetra (u čvorovima) na 10 m iznad tla za Zračnu luku Pula u razdoblju 01. siječnja 2005. do 30. travnja 2019. dobivene na temelju METAR izvješća bez termina s varijabilnim smjerom vjetra; (a) ožujak-svibanj, (b) lipanj-kolovoz(c) rujanj-studeneni, (d) prosinac – veljača. 1 čvor = 0,5144 m/s.

Slika 15 pokazuje da kroz godinu većinom puše vjetar sa sjeveroistoka do istoka. Podaci pokazuju također i manji pomak smjera puhanja bure u ZL Pula (za 22,5°), dominantno iz smjerova 68° i 90° (u skladu s numeričkim simulacijama, npr. slika 11b). Najjača bura, prema mjerenjima u navedenom razdoblju, puhala je 23. studenoga 2005.

godine. Na taj dan je izmjerena prosječna polusatna brzina vjetra od 36 čvorova (18 m/s ~ 65 km/h) s udarima vjetra od 49 čvora (24,5 m/s ~ 88 km/h).

Prema mjerenjima, u promatranom razdoblju bura jača od 20 čvorova je puhala 84,2 dana (2,022 sata). To je 2,3 puta više nego u slučaju ZL Rijeka, što nam daje za naslutiti da se iznad ZL Rijeka javlja strujanje koje smanjuje snagu bure. Južni vjetar u ZL Pula je puhao 622 dana, a jako jugo (preko 20 čvorova) samo 3,5 sati, što je rijetko, ali je ipak puno više nego u slučaju ZL Rijeka.

Sezonske ruže vjetra (slika 16) pokazuju da jaka bura puše najčešće tijekom zime, rjeđe na proljeće i jesen, a najrjeđe tijekom ljeta. U promatranom razdoblju, tijekom ljeta, bura jača od 10 m/s je puhala 208,5 sati, tj. njena učestalost je bila 6,7 %. Ljetna ruža vjetra također pokazuje utjecaj konvergentne zone strujanja koja se stvara nad postajom tijekom podneva uslijed interakcije istočnog i zapadnog smorca kroz izmjenu istočnih i zapadnih smjerova vjetra (Telišman Prtenjak i Grisogono, 2007). Tada nad postajom prijedodne dominiraju jugoistočni smjerovi lokalnog vjetra koji poslijepodne zakreću na zapadne smjerove s dolaskom jačeg zapadnog termički generiranog smorca.

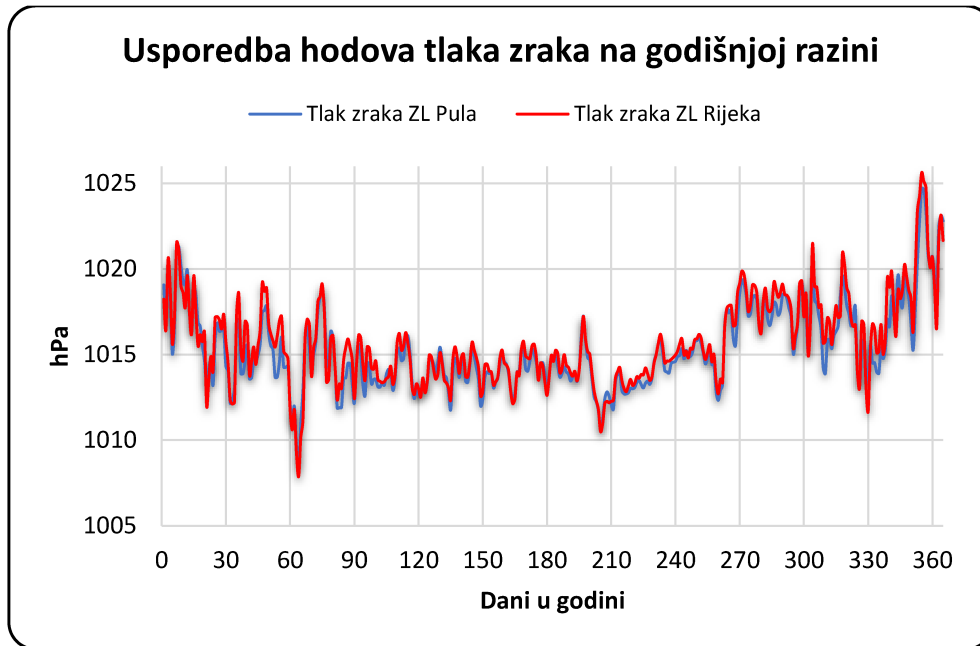


Slika 17. Godišnji hod tlaka zraka (hPa) reduciranoga na razinu mora za postaju Zračnu luku Pula za razdoblje od 01. siječnja 2005. do 30. travnja 2019.

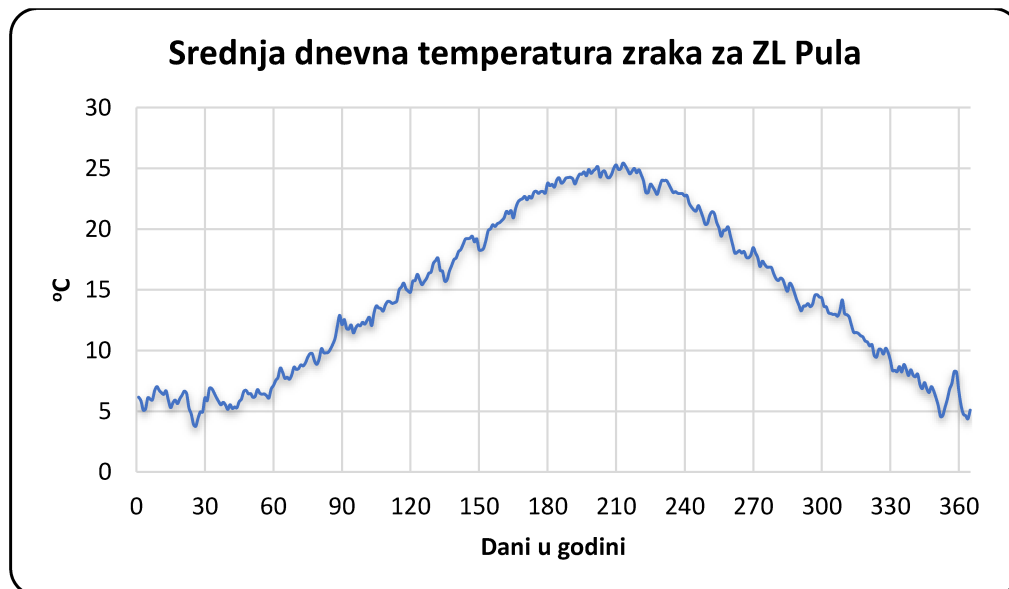
Za razliku od ZL Rijeka gdje postoji određeni manjak mjerenja, na području ZL Pula se mjeri tlak cijeli dan svakih pola sata (slika 17). Analiza podataka daje u promatranom razdoblju najvišu izmjerenu vrijednost tlaka zraka od 1,044 hPa i to 17. veljače 2008. godine, a najnižu od 974 hPa, 30. siječnja 2015. godine. Navedeni dani su isti dani kao i u slučaju ZL Rijeka. Hod tlaka zraka kroz godinu na području ZL Pula (slika 17) je vrlo sličan onome na postaji ZL Rijeka (slika 14). Trend tlaka zraka (narančasta isprekidana linija) koji je dobivena fitovanjem polinoma šestog reda na mjerene podatke, jednadžba polinom glasi:

$$y = 9 \cdot 10^{-13}x^6 - 1 \cdot 10^{-9}x^5 + 4 \cdot 10^{-7}x^4 - 8 \cdot 10^{-5}x^3 + 0.0083x^2 - 0.3829x + 1020.9$$

skoro je identičan onome iz ZL Rijeka s istim ponašanjem tijekom godine.



Slika 18. Usporedba hodova tlaka zraka (hPa) reduciranoga na razinu mora za Zračnu luku Rijeka (crveno) i Zračnu luku Pula (plavo) za razdoblje od 01. siječnja 2005. do 30. travnja 2019.



Slika 19. Godišnji hod srednje dnevne temperature zraka (°C) na 2 m visine iznad tla u Zračnoj luci Pula za razdoblje od 01. siječnja 2005. do 30. travnja 2019.

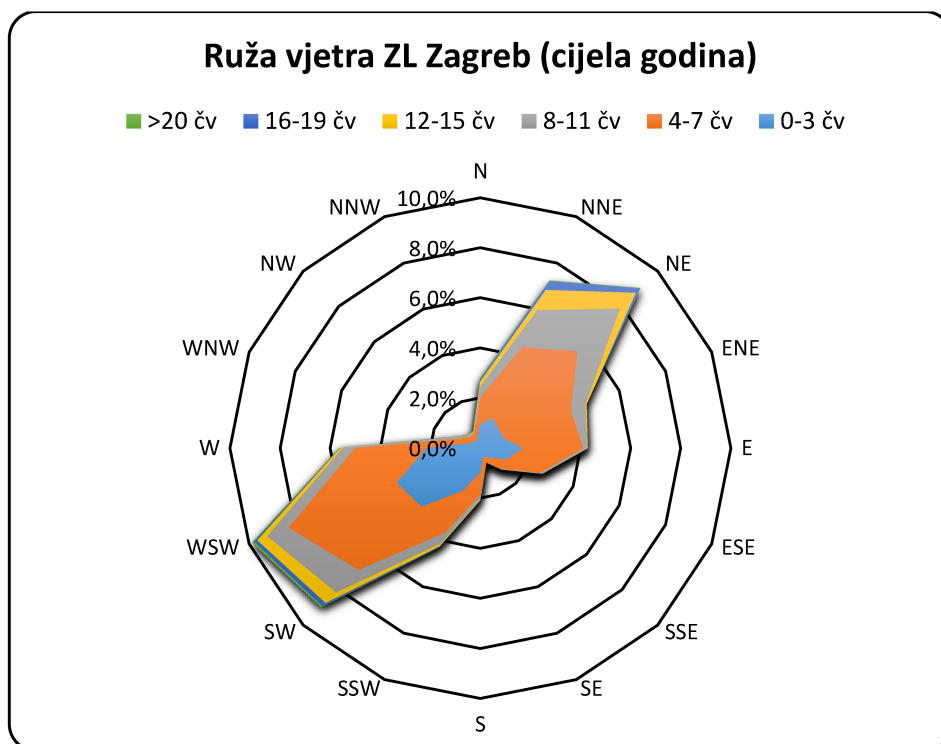
Usporedba hodova tlaka zraka na godišnjoj razini za obje postaje ZL Pula i ZL Rijeka (slika 18), pokazuju samo manje razlike potencijalno uzrokovane zbog manjeg broja mjerenja u ZL Rijeka (17 mjerenja dnevno) naspram ZL Pula (48 mjerenja dnevno). Razlike u vrijednostima tlaka zraka na području ZL Pula i ZL Rijeka su vrlo male što znači da se može uspoređivati tlak zraka mjeren u ZL Pula kao

reprezentativnom postajom za Jadran s onim 24-h mjerenim u ZL Zagreb. Navedena usporedba nam je važna ako želimo provjeriti je li su stvoreni uvjeti za puhanje bure na području Kvarnera.

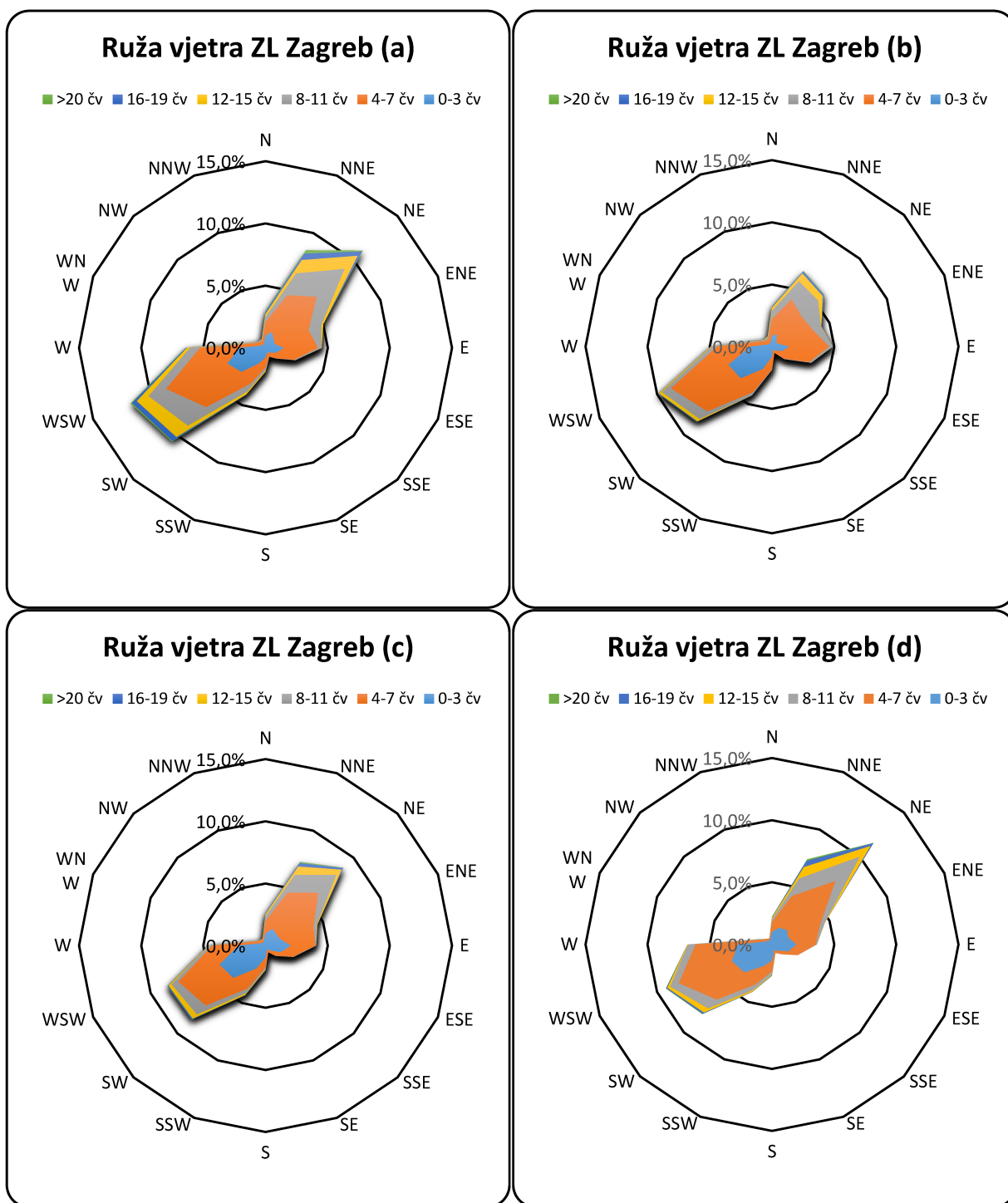
S obzirom na reducirani set mjerenja temperature zraka za područje ZL Rijeka (najčešće od 7:00 UTC do 18:30 UTC) bilo je nemoguće točno izračunati dnevnu srednju vrijednost temperature. Na području ZL Pula imamo cjelodnevna mjerenja što ih čini pogodnima za analizu i kasnije usporedbu s temperaturom u zaleđu planine tj. na području ZL Zagreb. Slika 19 pokazuje očekivano godišnje kretanje srednje temperature. Niže vrijednosti temperature se mjere tijekom zime i kasne jeseni, dok maksimalne temperature mjerimo krajem srpnja i početkom kolovoza. U razdoblju od 01. siječnja 2005. do 30. travnja 2019., najniža temperatura u iznosu od $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ je izmjerena 25. siječnja 2006. i 11. siječnja 2017. Najviša vrijednost temperature od $38\text{ }^{\circ}\text{C}$ izmjerena je 19. srpnja 2007. te 3. i 5. kolovoza 2017.

3.3. Zračna luka Zagreb

Za razliku od Kvarnerskog zaljeva koji je pod maritimnim utjecajem te karakterističnim



Slika 20. Godišnja ruža vjetra (u čvorovima) na 10 m iznad tla za Zračnu luku Zagreb u razdoblju 01. siječnja 2005. do 30. travnja 2019. dobivene na temelju METAR izvješća. 1 čvor = $0,5144\text{ m/s}$.



Slika 21. Tromjesečne (sezonske) ruže vjetra (u čvorovima) na 10 m iznad tla za Zračnu luku Zagreb u razdoblju 01. siječnja 2005. do 30. travnja 2019. dobivene na temelju METAR izvješća; (a) ožujak-svibanj, (b) lipanj-kolovoz, (c) rujan-studeni, (d) prosinac - veljača. 1 čvor = 0,5144 m/s.

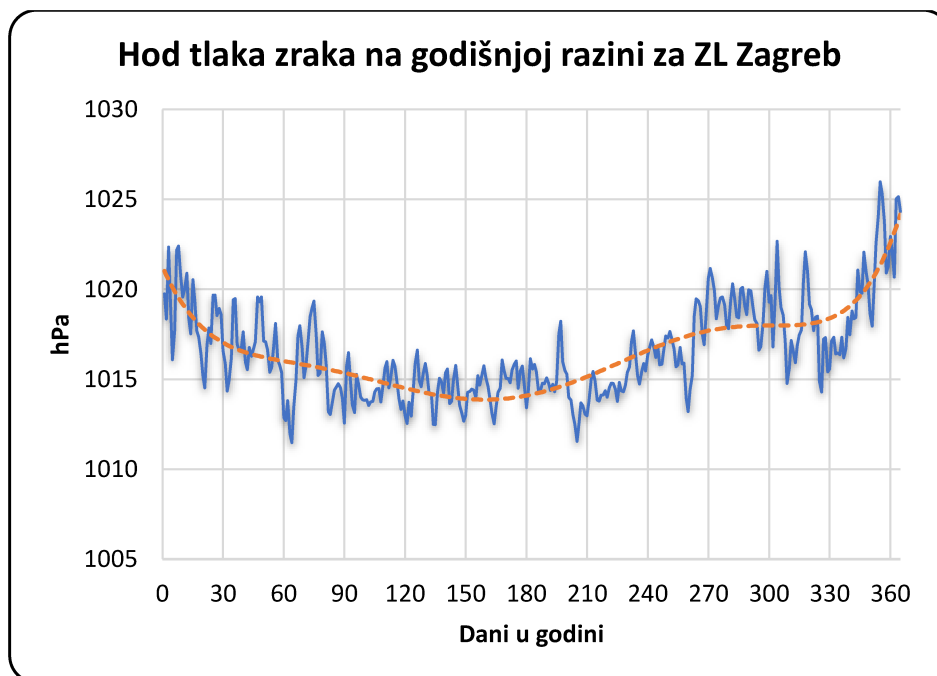
strujanjima vezanih za diskontinuitet podloge (kopno-more), ZL Zagreb je smještena u kontinentalnom dijelu. Obilježja vjetra na postaji ZL Zagreb koja se nalazi na 130 km od obale su dominacija vjetra sa sjeveroistoka i jugozapada (tablica 1, slika 20). U ruži vjetra je vidljiv i utjecaj obližnje Medvednice koja modulira polje strujanja (Lisac, 1984). Podaci pokazuju da je najjači vjetar puhao 30. srpnja 2014. prosječnom

polusatnom brzinom od 38 čvorova (14 m/s) iz jugozapadnog smjera. Čak 86% zabilježenog vjetra je slabije od 3,5 m/s te je 53,13% slučajeva u kojima vjetar puše iz smjera sjevera, sjever-sjeveroistok i sjeveroistoka. Učestalost vjetra koji puše iz smjera istoka nad ZL Zagreb (slika 20) je mnogo manja nego ZL Rijeka i ZL Pula, gdje je vjetar iz istočnog smjera drugi po učestalosti. Sezonske ruže vjetra po tromjesečjima (slika 21) pokazuju slabu promjenjivost učestalosti i brzine vjetra kroz godinu. U analiziranom razdoblju, vjetar najjačeg intenziteta je zabilježen tijekom jeseni dok slab vjetar puše tijekom proljeća. Usporedba ruža vjetra na svim postajama otkriva/potvrđuje utjecaj Jadranskog mora na strujanje vjetra na području Kvarnera te pokazuje da je njegov doseg na kontinentalni dio Hrvatske zbog prirodne prepreke (planine) ograničen.

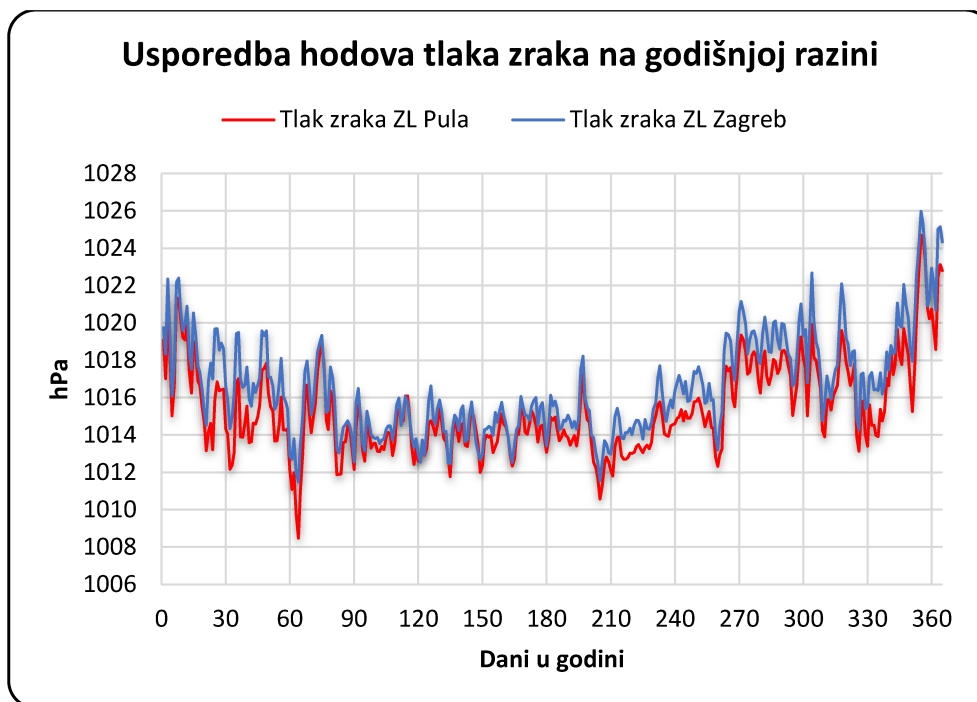
Na području ZL Zagreb tlak zraka se mjeri cijeli dan, svakih pola sata. Nakon provedene analize podataka za promatrano razdoblje, najviši izmjereni tlak zraka je 1046 hPa i to 16. i 17. veljače 2008. godine, a najniži 973 hPa, 30. siječnja 2015. godine. Trend hoda tlaka zraka (slika 22, narančasta isprekidana linija) dobivena je prilagodbom polinoma šestog reda na mjerene podatke. Jednadžba polinom glasi:

$$y = 7 \cdot 10^{-13}x^6 - 8 \cdot 10^{-10}x^5 + 3 \cdot 10^{-7}x^4 - 6 \cdot 10^{-5}x^3 + 0.0053x^2 - 0.2558x + 1021.3$$

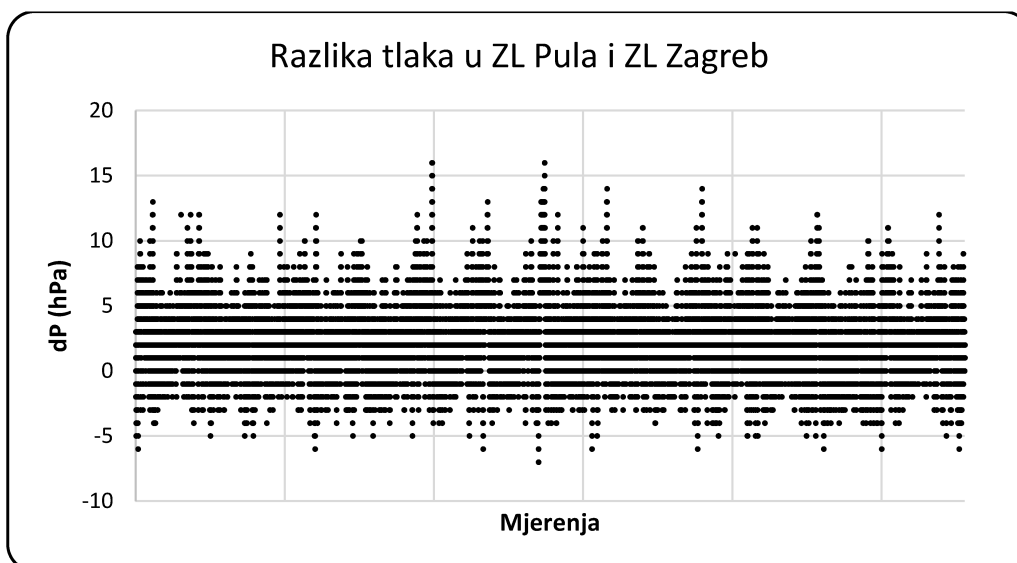
Usporedimo hodova tlaka zraka na ZL Pula (crveno) i ZL Zagreb (plavo) na slici 23, vidimo manje razlike s nižim izmjerenim vrijednosti tlaka zraka na području ZL Pula nego u ZL Zagreb. Najveće razlike su tijekom veljače, srpnja, kolovoza i listopada.



Slika 22. Hod tlaka zraka (hPa) reduciranoga na razinu mora za Zračnu luku Zagreb za razdoblje od 01. siječnja 2005. do 30. travnja 2019.



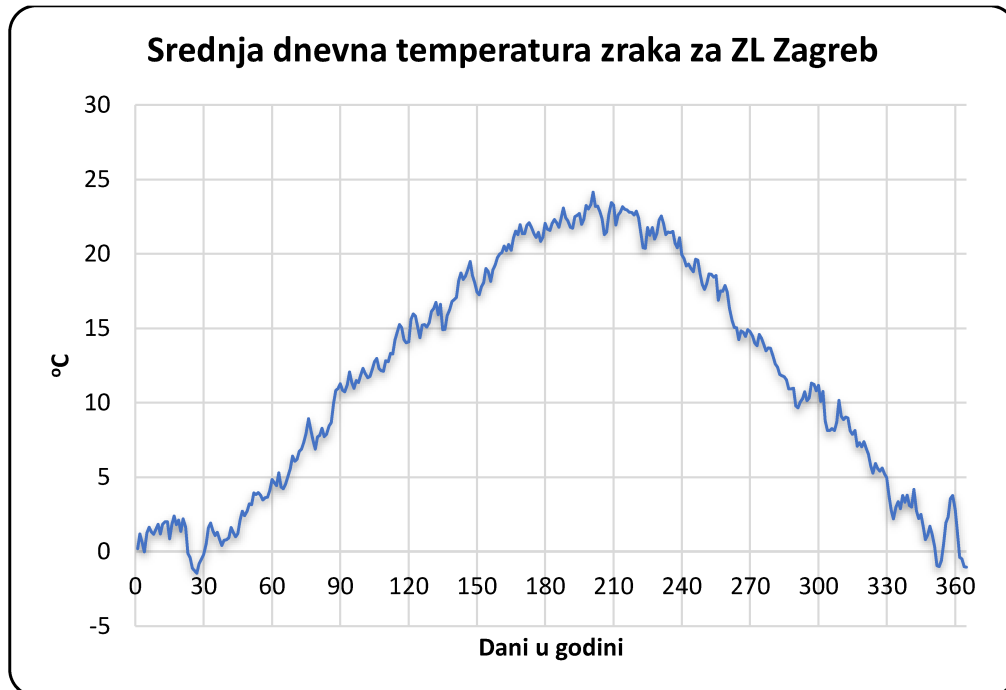
Slika 23. Usporedba hodova tlaka zraka (hPa) za Zračnu luku Zagreb (plavo) i Zračnu luku Pula (crveno) za razdoblje od 01. siječnja 2005. do 30. travnja 2019.



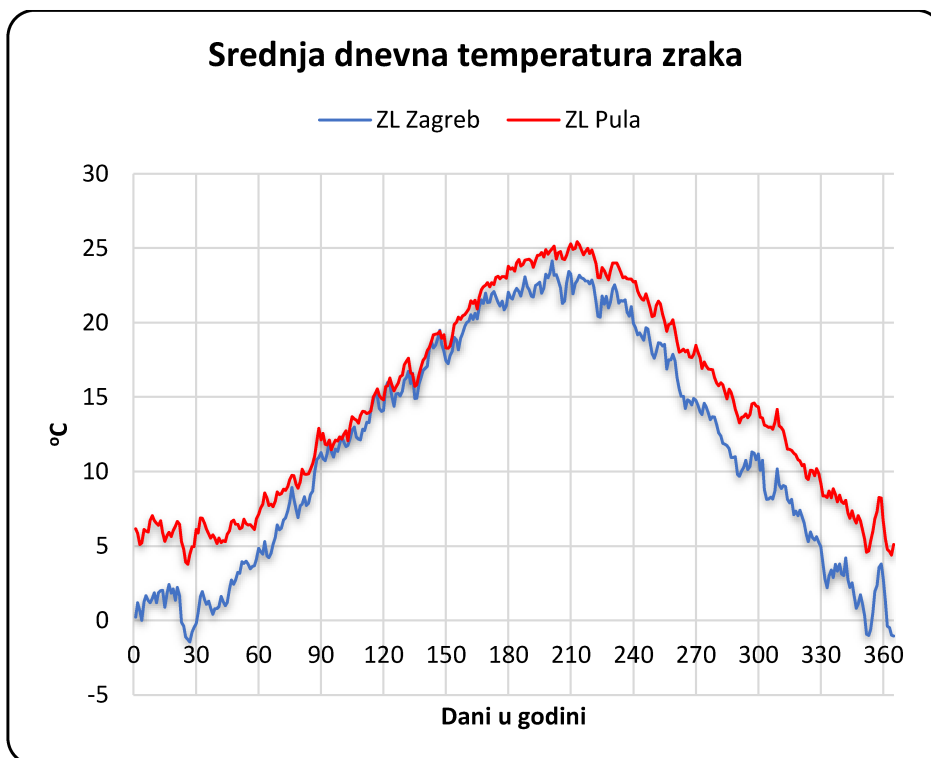
Slika 24. Razdioba razlike tlakova između postaja Zračna luka Zagreb i Zračna luka Pula za slučajeve kada u Zračnoj luci Pula puše vjetar iz smjerova od sjevera do istoka (prvi kvadrant) za razdoblje od 01. siječnja 2005. do 30. travnja 2019. (111130 mjerenja).

Analiziramo li razliku tlaka ZL Zagreb i ZL Pula, u cijelom razdoblju, za slučaju kada u ZL Pula puše vjetar iz smjera od sjevera do istoka (prvi kvadrant) dobiva se u prosjeku tlak ZL Zagreb veći za 2,43 hPa od onoga za ZL Pula. Podaci analize koja koristi samo kriterij smjera su $\overline{dP} = 2,43 \text{ hPa}$ i $\sigma = 2,50 \text{ hPa}$ što je rezultat skupa od 111130 mjerenja (slika 24). U slučaju uvođenja praga brzine kao dodatnog kriterija na području ZL Pula (≥ 10 čvorova) razlika tlaka postaje veća i to $\overline{dP} = 4,35 \text{ hPa}$ i $\sigma =$

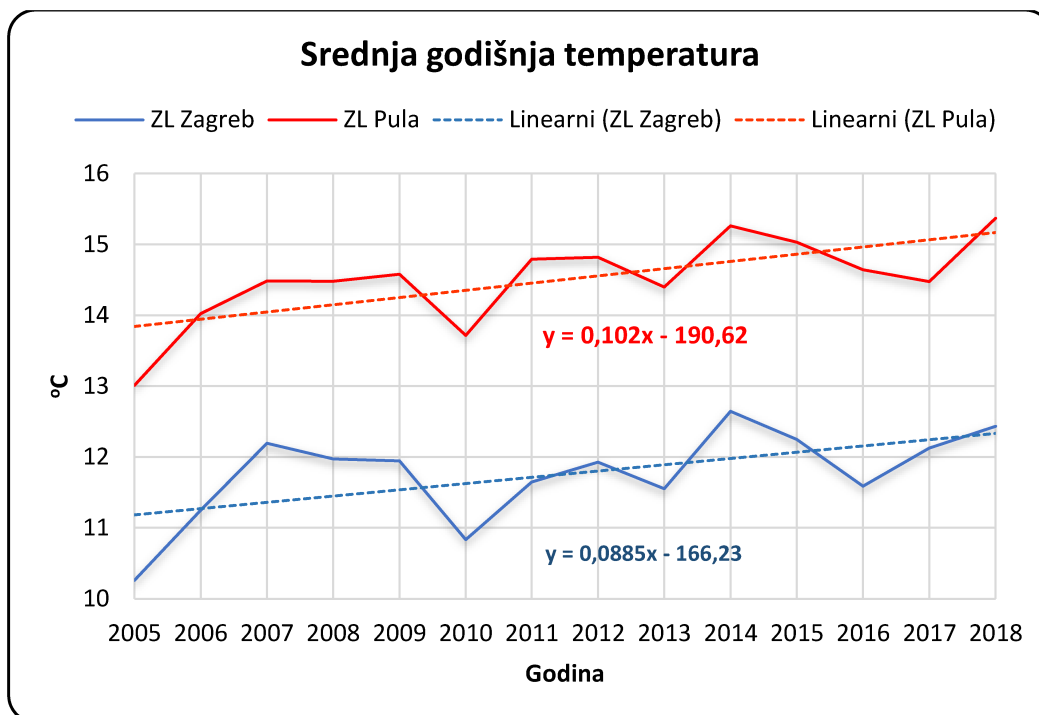
2,36 hPa za set podataka od 32341 mjerenja (nije prikazano). Ovi odnosi ukazuju da se mogu koristiti kao selekcijski kriterij za pojavu rotora.



Slika 25. Hod srednje dnevne temperature zraka (°C) s 2 m iznad tla na postaji Zračna luka Zagreb za razdoblje od 01. siječnja 2005. do 30. travnja 2019.



Slika 26. Usporedba kretanja srednje dnevne temperature zraka (°C) s 2 m iznad tla na postajama Zračna luka Zagreb i Zračna luka Pula za razdoblje od 01. siječnja 2005. do 30. travnja 2019.



Slika 27. Usporedba hodova srednje godišnje temperature zraka (°C) s 2 m iznad tla na postajama Zračna luka Zagreb i Zračna luka Pula za razdoblje od 01. siječnja 2005. do 31. prosinca 2018.

U razdoblju od 01. siječnja 2005. do 30. travnja 2019., najniža temperatura na području ZL Zagreb u iznosu od -21 °C , izmjerena je 21. prosinca 2009., 9. veljače 2005. i 9. veljače 2012. Najviša izmjerena vrijednost temperature od 39 °C izmjerena je 24. kolovoza 2012. i 8. kolovoza 2013.

Hodovi srednje dnevne temperature na području ZL Zagreb (slika 25), najviše vrijednosti mjerimo tijekom kolovoza, a najniže početkom veljače. Usporedimo li hodove srednjih dnevnih temperatura na postajama ZL Zagreb i ZL Pula (slika 26) mogu se uočiti u prosjeku više temperature u ZL Pula. Najveće razlike u temperaturi imamo tijekom jeseni i zime, dok je najmanja tijekom proljeća. Lokacije pokazuju dva utjecaja klimatskih faktora na temepraturu: (i) utjecaj mora (osobito tijekom zime) te (ii) razlike u nadmorskim visinama.

U razdoblju od 2005. do 2018. godine srednja godišnja temperatura je u prosjeku veća u ZL Pula za 2,75 °C od one koja se mjeri u ZL Zagreb. Jasno je izražen trend povećanja srednje godišnje temperature kod obje mjerne postaje. Srednja godišnja temperatura je 2005. na ZL Pula bila 13,01 °C dok je 2018. iznosila 15,37 °C što je razlika od 2,36 °C u 13 godina. Kod ZL Zagreb imamo sličnu situaciju, srednja godišnja temperatura je rasla od 10,26 °C na 12,34 °C što je povećanje od 2,17 °C.

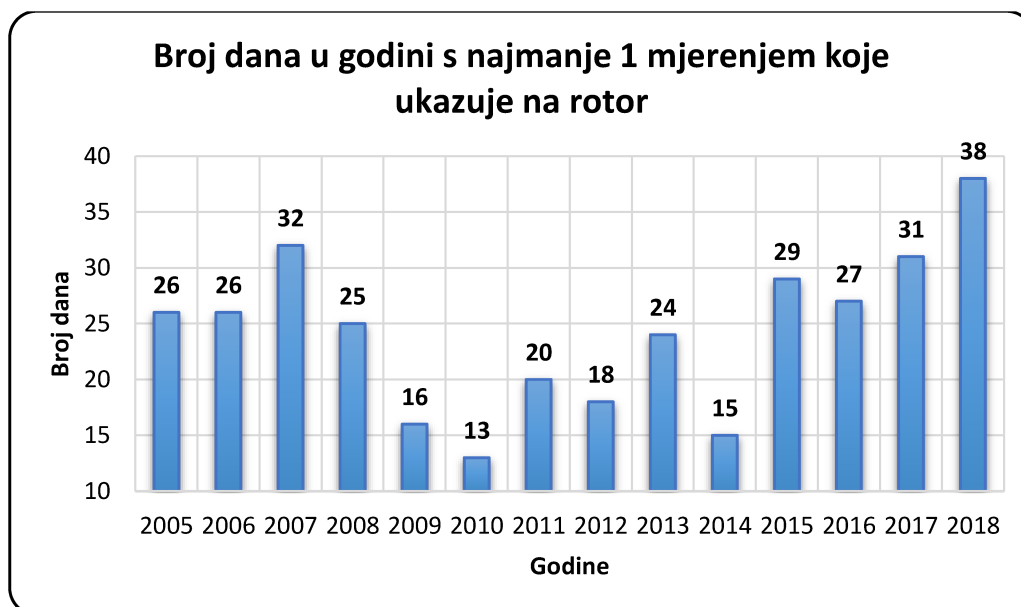
4. REZULTATI ISTRAŽIVANJA ROTORA

4.1. Identificiranje rotora

Izdvajanje dana u kojima su stvoreni preduvjeti za pojavu „Mohorovičićevog“ rotora zahtjevalo je definiranje uvjeta koje zatim je trebalo primijeniti na bazi podataka. Pošto je baza podataka velika, tj. ima skoro 43 milijuna zapisa koji su strukturirani u 753552 setova podataka, bilo je potrebno napraviti algoritam za izdvajanje potencijalnih rotora. U tu svrhu koristili su se navedeni početni kriteriji iz poglavlja 2.2. Algoritam bi trebao izdvojiti zanimljive setove podataka s određenim karakteristikama iz cijele baze dana uvažavajući strogoću zahtjeva pojedinih selekcijskih kriterija. Iako mora biti dovoljno „blag“ da nam selektira određen broj potencijalnih dana mora umanjiti pojavu šuma u najmanjoj mogućoj mjeri.

Filtar koji nam daje upotrebljivu bazu podataka i u skladu je s uvjetima navedenim u poglavlju 2.2. i uvažavajući da povišeni tlak u ZL Zagreb naspram ZL Pula pogoduje nastanku bure (poglavlje 3.3., slika 24) glasi:

- U ZL Pula puše vjetar iz smjerova NNE do E
- Barem jedno mjerenje u danu gdje je razlika u brzini vjetra u ZL Pula veća ili jednaka 10 čvorova od one u ZL Rijeka
- Vjetar u ZL Rijeka puše iz smjerova od SE do WNW
- Razlika prizemnog tlaka između postaja ZL Zagreb i ZL Pula treba biti ≥ 2 hPa

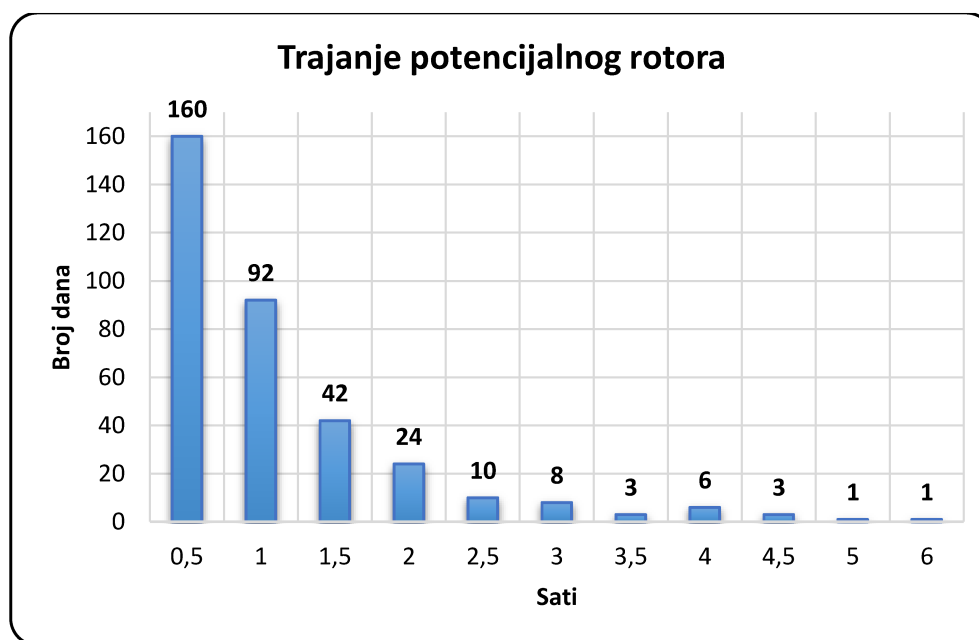


Slika 28. Selektirani set podataka = broju dana u godini s najmanje jednim mjerenjem koje zadovoljava uvjete za identificiranje rotora za razdoblje od 01. siječnja 2005. do 31. prosinca 2018.

Navedeni filter je izdvojio 788 setova podataka. Drugim riječima, izdvojeno je 350 dana s najmanje jednim mjerenjem koje ukazuje na postojanje rotora. Što daje vjerojatnost pojavljivanja barem jednog mjerenja koje ukazuje na rotor u jednom danu od 6,69 %. Na slici 27 je prikazana je distribucija navedenih dana po godinama. Vidljivo je da je najveći broj dana s najmanjem jednim mjerenjem koje ukazuje na rotor bio u 2018. godini (38 dana) dok je minimalan broj dana bio 2010. godine (13 dana). Pošto za 2019. nemamo mjerenja za cijelu godinu, nismo je prikazali na grafu, ali je važno spomenuti da je od početka godine do 30. travnja 2019. identificirano 10 dana s minimalno jednim mjerenjem koje ukazuje na rotor. U Prilogu B ovog rada navedeni su svi dani u kojima se pojavilo barem jedno mjerenje koje je izdvojio filter, tj. pobrojani su dani u kojima su se stvorili preduvjeti za formiranje rotora.

4.2. Analiza trajanja rotora

Pošto nam je filter izdvojio relativno velik broj dana s najmanje jednim mjerenjem koje ukazuje na rotor, analizirat ćemo koliko je mogao trajati rotor prema podacima koje imamo. Mjerenja se vrše svakih pola sata (Nyquistova frekvencija je 1 h) što bi trebalo biti dovoljno za detekciju rotora na dnevnoj skali.



Slika 29. Prikaz trajanja potencijalnih rotora u danu za razdoblje od 01. siječnja 2005. do 30. travnja 2019.

Mohorovičić je naveo da se kumulacija koji je nastao zbog formiranja rotora održao od ranih jutarnjih sati do kasnog popodne s kratkom stankom oko podneva. Analiziramo li sliku 29 vidimo da u razdoblju mjerenja nemamo veliki broj dana s trajanjem rotora dužim ili jednakim 3 sata (22 slučaja). Iz Mohorovičićevih zapisa se, nažalost, ne može sa sigurnošću povezati trajanje opaženog kumulusa s trajanjem mjerenja koja ukazuju na rotor, pa ćemo pretpostaviti da dulje trajanje rotora pogoduje

formiranju kumulusa. Tako možemo zaključiti da vjerojatnost za pojavu kumulusa iznad ZL Rijeka raste s trajanjem rotora.

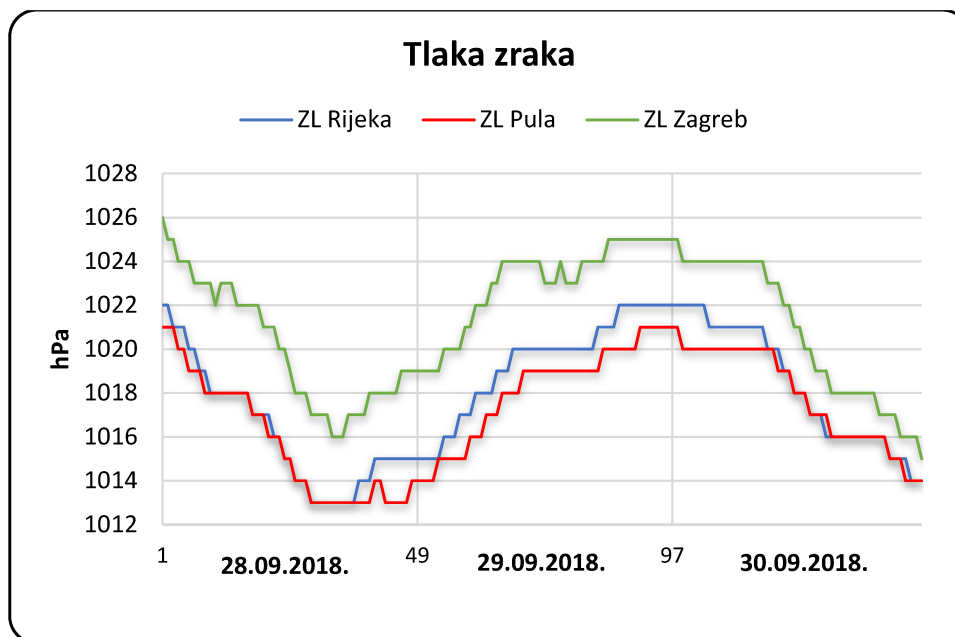
4.3. Analiza odabranih slučajeva iz seta podataka

Da bi sa sigurnošću mogli tvrditi da kod nekog od navedenih datuma pojavio i „Mohorovičićev“ rotor trebali bi na taj dan izmjeriti vertikalni profil vjetra iznad ZL Rijeka. U slučaju da nam vertikalni profil vjetra ukazuje na rotor mogli bi sa sigurnošću reći da se navedenog dana formirao rotor iznad ZL Rijeka. Pošto se ne vrše mjerenja vertikalnog profila vjetra nad ZL Rijeka morat ćemo pribjeći Mohorovičićevoj metodi opažanja i analize oblaka iznad ZL Rijeka da bi dokazali horizontalni rotor. HKZP ima postavljenu kameru na istočnom djelu Učke koja je usmjerena prema otoku Krku te se stanje neba iznad ZL Rijeka fotografira i arhivira. Za potreba ovog rada, HKZP nam je ustupio fotografije za novije odabrane datume da ih možemo analizirati i tako pokazati da se rotor dogodio; odnosno testirati uspješnost algoritma. HKZP nije arhivirao fotografije nastale prije 01. lipnja 2018. godine, tako da nećemo razmatrati slučajeve koji su nastali prije tog datuma.

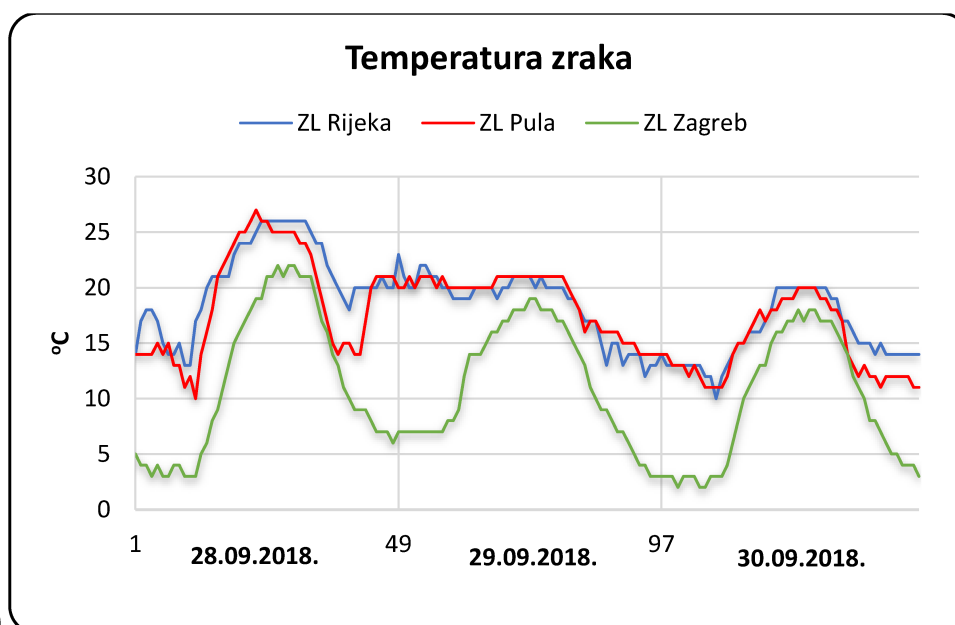
Od 01. lipnja 2018. do 31. ožujaka 2019. zabilježena su 23 dana s najmanje jednim mjerenjem koje ukazuje na rotor. Pretpostavili smo da vjerojatnost za pojavu kumulusa raste s trajanjem potencijalnog rotora, tako da nećemo razmatrati one dane sa samo jednim mjerenjem. Kao rezultat, dolazimo do 19 dana koje je bilo potrebno analizirati. Prilikom analize uspoređivao se cjelokupni set podataka za ZL Rijeka, ZL Zagreb i ZL Pula za identificirane dane te setovi podataka za dan prije i poslije identificiranog dana. Nakon toga bilo je potrebno odbaciti dane u kojima je konstatirano da bura puše prekratko, samo jedan dan ili manje (nije zabilježeno puhanje bure u danu prije niti u danu poslije) te slučajeve kada je zabilježena preslaba promjenljivost jačine i smjera vjetra koda ZL Rijeka. Za dobivene dane je napravljena i analiza fotografija na kojima se tražila formacija oblaka koja je dokumentirana u Mohorovičić (1888a). Naposljetku su identificirana tri dana kada se prema mjerenjima i fotografijama pojavio rotor iznad ZL Rijeka koja ćemo i detaljno analizirati u ovom poglavlju.

4.3.1. Idealan primjer rotora

Prvi promatrani slučaj rotora se dogodio 29. rujna 2018. godine i možemo reći da je idealan primjer rotora u vertikali iznad ZL Rijeka. Na području ZL Pula i ZL Rijeka je zabilježen niži tlak zraka u sva tri dana od onoga u ZL Zagreb (slika 30a). Tlak zraka je povišen što ukazuje na anticiklonu, tj. vidjet ćemo kasnije na anticiklonalnu buru. Dnevni hod temperature je očekivan u slučaju ZL Zagreb. Mjerenja u ZL Rijeka i ZL Pula pokazuju manje razlike u dnevnim i noćnim vrijednostima temperature zraka, pogotovo 29. rujna 2018. kada se pojavljuje i rotor. Bura na obali je snizila prizemnu temperaturu zraka (slika 30b) jer hladniji zrak iz zaleđa prodire prema moru i miješa se s postojećim zrakom na obali.



(a)

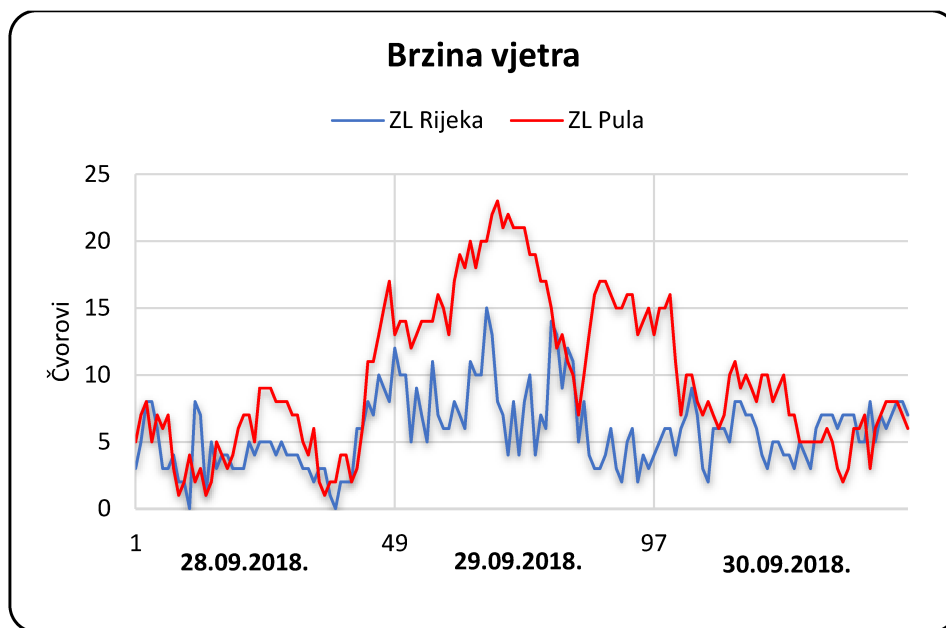


(b)

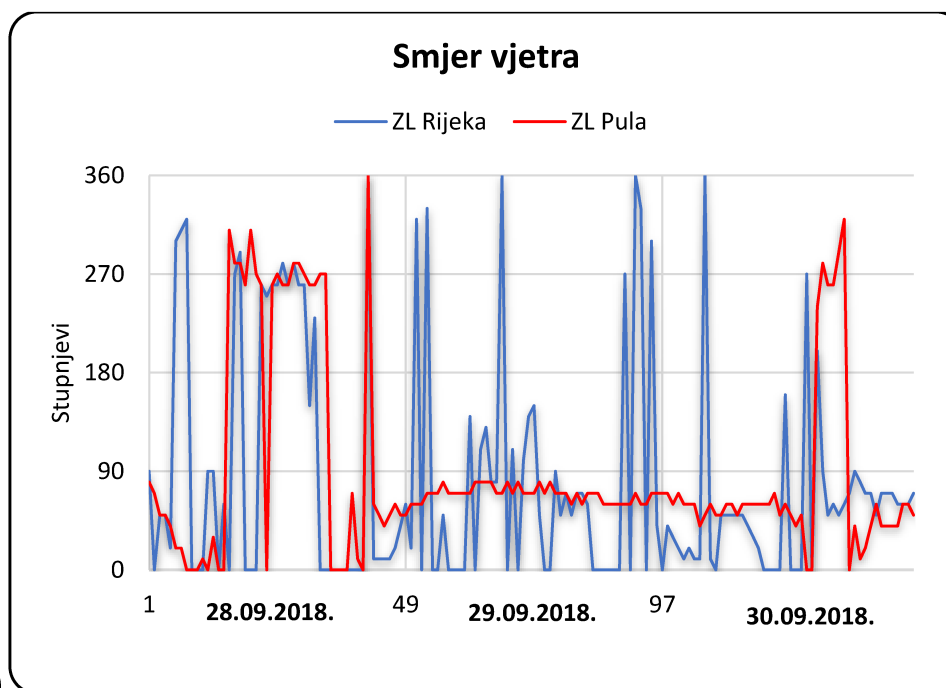
Slika 30. Prikaz dnevnog hoda (a) tlaka zraka (hPa) reduciranog na razinu mora i (b) temperature zraka (°C) 2 m iznad tla za Zračnu luku Rijeka, Zračnu luku Pula i Zračnu luku Zagreb u razdoblju od 28. do 30. rujna 2018. U jednom danu ima 48 mjerenja (svakih pola sata), ukupno 144 mjerenja u 3 dana.

Brzina vjetra na ZL Pula pokazuje početak bure u 21:30 UTC, 28. rujna 2018. i njeno trajanje do 02:00 UTC, 30. rujna 2018. s prosječnom brzinom od 8 m/s (slika 31a). Na području ZL Rijeka se nakon početka puhanja bure bilježe niže vrijednosti brzine vjetra, ispod 5 m/s (prosječna vrijednost brzine vjetra u tom razdoblju je 3,8 m/s). Zanimljivo je da su od 15:00 UTC do 18:00 UTC, 29. rujna 2018. brzine vjetra skoro identične. Smjerovi vjetra u ZL Pula i ZL Rijeka (slika 31b) do početka bure pokazuju pojavu zapadnog strujanja uz manje razlike. S početkom bure, na području ZL Pula, bura se manifestira kao perzistentni istočni vjetar. Na području ZL Rijeka puše vjetar promjenjivog smjera s naglasnom na smjerovima sjever odnosno sjever-

sjeverozapad. Nakon što prestane puhati bura, smjer vjetra na ZL Pula pokazuje veću varijabilnost. Navedena obilježja vjetra pokazuje velike sličnosti s onima koja je opisao



(a)

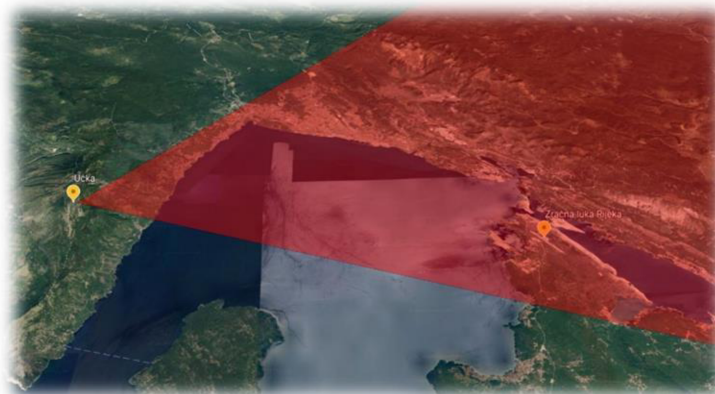


(b)

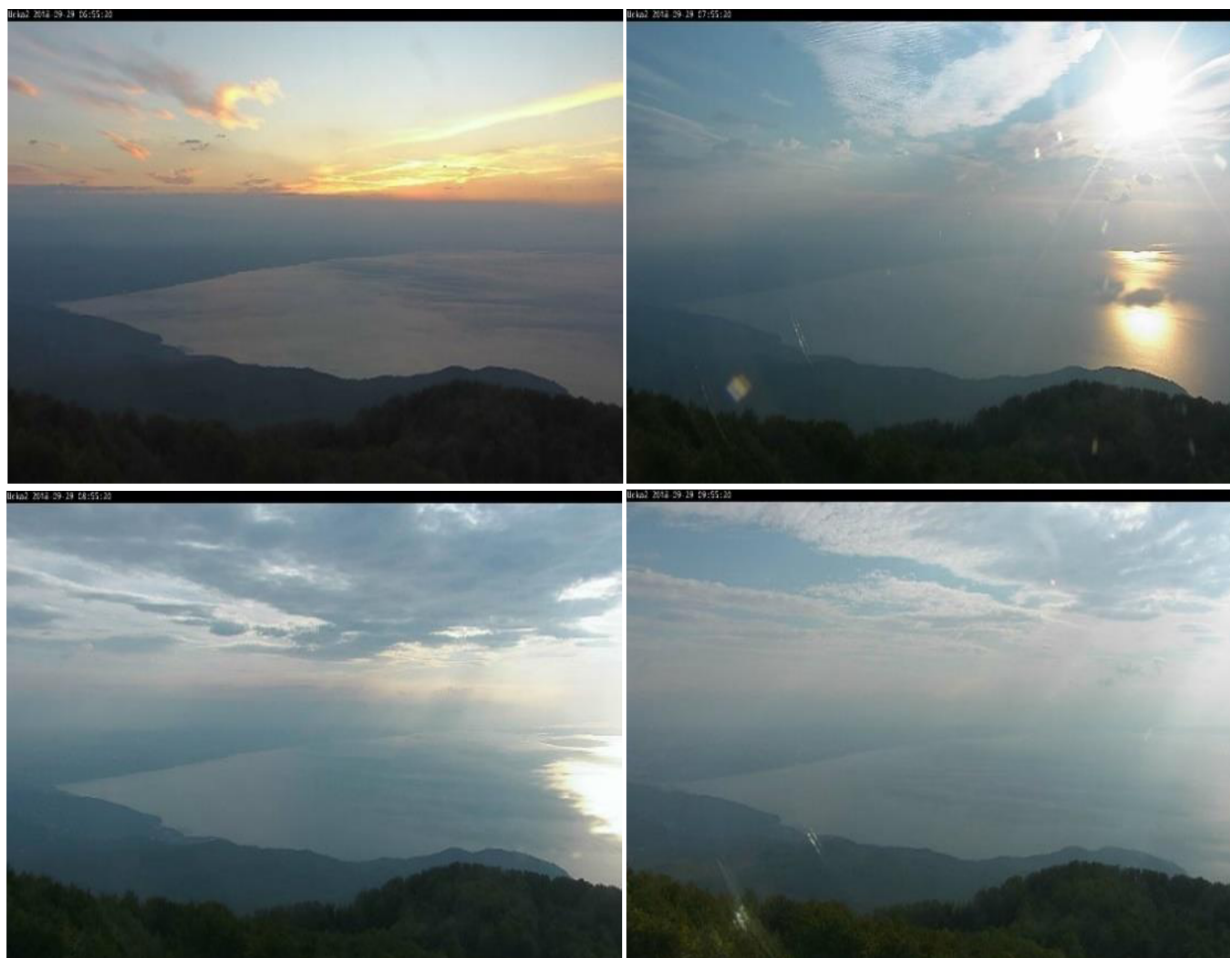
Slika 31. Prikaz (a) brzine vjetra (u čvorovima) i (b) smjera vjetra za Zračnu luku Rijeka i Zračnu luku Pula od 28. do 30. rujna 2018. U jednom danu ima 48 mjerenja (svakih pola sata), ukupno 144 mjerenja u 3 dana. 1 čvor = 0,5144 m/s.

Mohorovičić (1888a). Smjer vjetra na području ZL Rijeka je suprotan od onoga u ZL Pula gdje puše bura. Brzina vjetra u ZL Rijeka je duplo niža od one u ZL Pula, što nam ukazuje na moguću pojavu rotora nad otokom Krkom.

Fotografije koje ćemo koristiti za analizu neba iznad ZL Rijeka nastale su uz pomoć kamere koja snima nebo iznad ZL Rijeka te je postavljena na području Učke i usmjerena je prema Riječkom zaljevu (slika 32).



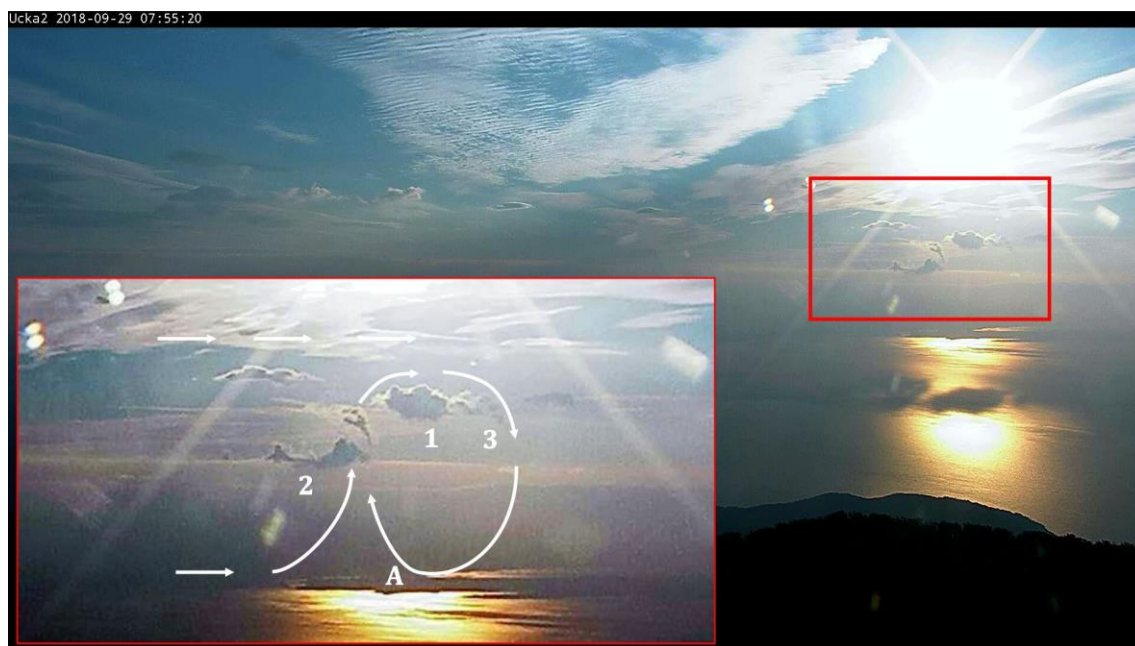
Slika 32. Prikaz lokacije i područja snimanja kamere (Google Earth, dostupno na: <https://earth.google.com/web/> [12. prosinca 2019.])



Slika 33. Prikaz neba iznad Zračne luke Rijeka za četiri termina (6:55, 7:55, 8:55 i 9:55 UTC) 29. rujna 2018.

Jedan od razloga što smo izabrali 29. rujna 2018. je i činjenica da je u zraku bilo dovoljno vlage da bi se stvorili oblaci. Fotodokumentacija neba iznad ZL Rijeka jasno prikazuje kretanje oblaka i formaciju koju je i uočio Mohorovičić (slika 33).

Za potrebe detaljne analize obrađena je fotografija nastala u 7:55 UTC 29. rujna 2018., pojačani su kontrasti, povećana zasićenost boja te zumiran dio na kojem se vide oblaci iznad ZL Rijeka (slika 34). Na većim visinama vidimo cirokumuluse (Cc) dok se ispod njih nalaze altostratusi (As), na povećanom dijelu slike vidi se kompleksna formacija kumulusa (Cu). Prizemno strujanje vjetra postaje uzlazno radi hidrauličnog skoka te se formiraju mali Cu (2) koji se dalje gibaju prema većem Cu i spajaju s njim (1). Na zadnjoj strani Cu otkidaju se manji oblačići koji putuju prema dolje i nestaju (3). Strelice prikazuju pretpostavljeno strujanje zraka koje je slično Mohorovičićevom. Jedina je razlika, što u našem slučaju, imamo mjernu postaju (A) gdje je izmjeren vjetar suprotnog smjera od puhanja bure, a Mohorovičić je navedeno strujanje pretpostavio. Nadalje, Mohorovičić je mjerio brzinu i smjer gibanja oblaka što mi nismo, nego smo pretpostavili gibanja oblaka na osnovu fotografija neba.

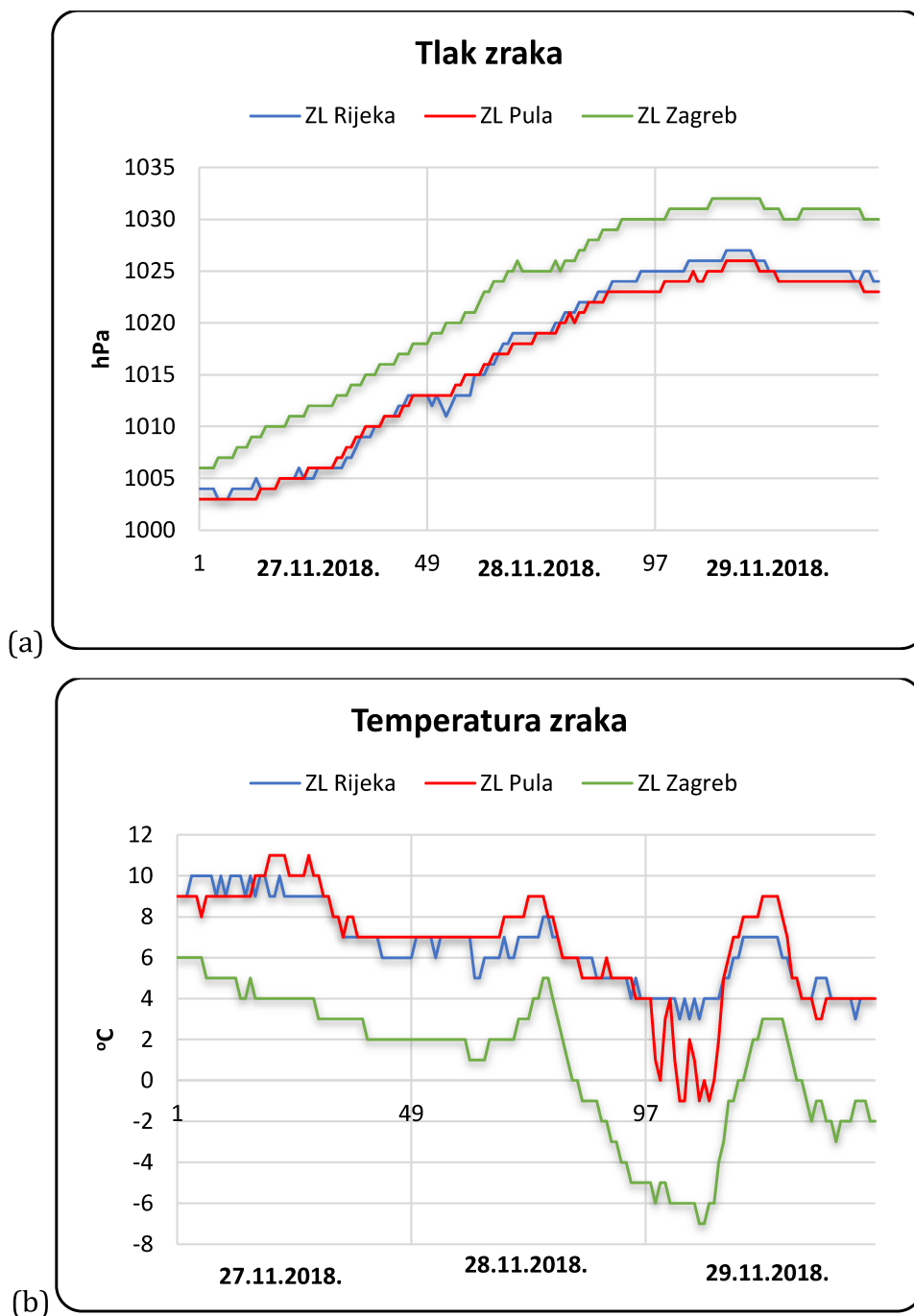


Slika 34. Obrabljena fotografija koja prikazuje nebo iznad Zračne luke Rijeka u terminu 7:55 UTC, 29. rujna 2018. 1 – kumululus (Cu), 2 – manji fragmentirani Cu koji će se stopiti s većim, 3- mali oblačići koji se otkidaju od Cu i nestaju, A – mjerna postaja. Strelice prikazuju strujanje zraka.

Na temelju svega navedenoga možemo zaključiti da se 29. rujna dogodio rotor iznad ZL Rijeka. Trebali bi analizirati još nekoliko rotora da vidimo je li s pojačavanjem bure dolazi do pomaka osi rotacije prema pučini. U tom slučaju, rotor ne bi utjecao na režim strujanja na postaji te u ZL Rijeka ne bi mjerili suprotan smjer vjetra od onoga u ZL Pula. Pitanje je kako pojava rotora utječe na brzinu vjetra odnosno je li ona mora biti manja u ZL Rijeka od one mjerene u ZL Pula.

4.3.2. Rotor s pomicanjem osi vrtloženja u prostoru

Drugi promatrani slučaj rotora se dogodio 28. studenoga 2018. te je nešto različit od prvoga. Mjerenja tlaka zraka nam pokazuju povišen tlak s tendencijom rasta na području sve tri mjerne postaje (slika 35a).

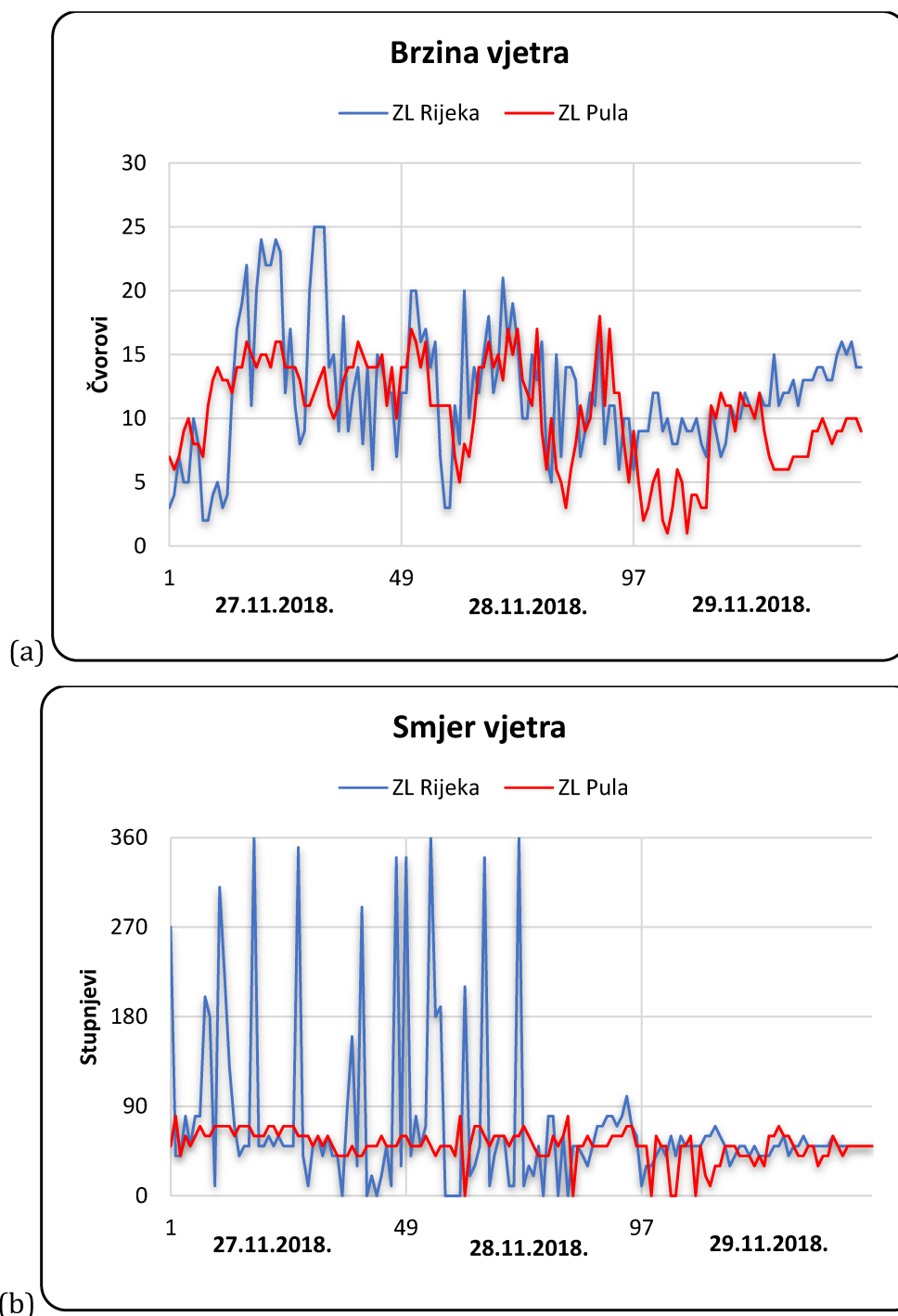


Slika 35. Prikaz (a) tlaka zraka (hPa) reduciranog na razinu mora i (b) temperature zraka (°C) na 2 m iznad tla za Zračne luke Rijeka i Zračne luke Pula od 27. do 29. studenoga 2018. U jednom danu ima 48 mjerenja (svakih pola sata), ukupno 144 mjerenja u 3 dana.

Hod temperature zraka (slika 35b) nam ukazuje na prodor hladnijeg zraka na područje Kvarnerskog zaljeva s kontinenta. Bilježi se manji pad temperature u noći 29.

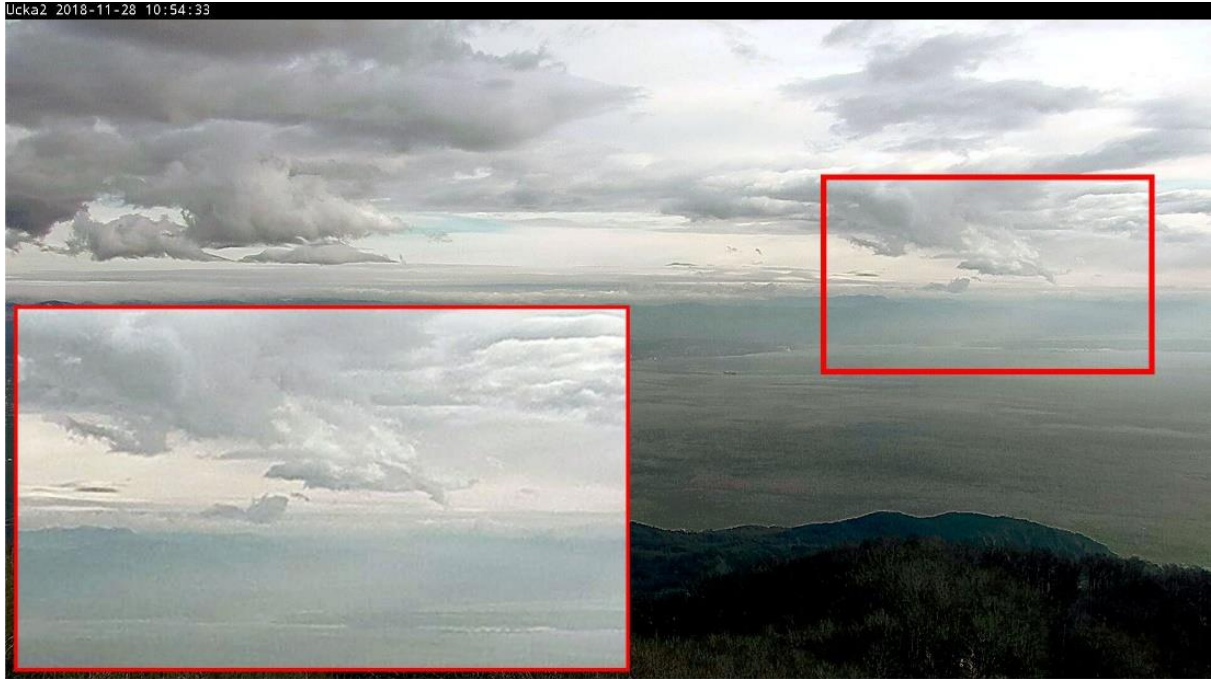
studenoga na području ZL Rijeka od onog u ZL Pula što prate veće brzine vjetra na ZL Rijeka u tom razdoblju.

Brzina vjetra u ZL Pula manja je od one izmjerene u ZL Rijeka (slika 36a). Za promatrano razdoblje, srednja brzina vjetra kod ZL Rijeka iznosi 6,2 m/s, a nešto manja srednja brzina od 5,3 m/s je izmjerena u ZL Pula.



Slika 36. Prikaz (a) brzine vjetra (u čvorovima) i (b) smjera vjetra za Zračnu luku Rijeka i Zračna luka Pula od 27. do 29. studenoga 2018. 48 mjerenja u jednom danu (svakih pola sata), ukupno 144 mjerenja u 3 dana. 1 čvor = 0,5144 m/s.

Smjer vjetra tijekom bure na području ZL Pula pokazuje istok-sjeveroistok. Varijabilni smjer puhanja bure prisutan je u zapisu postaje do podneva (12:00 UTC) 28. studenoga 2018. Nakon toga nema više varijacija u smjeru vjetra te vjetar pokazuje veliku stalnost. S obzirom na navedeno, može se očekivati pojava rotora u prijedopodnevni satima, dok popodnevni sati unatoč daljnjem puhanju bure ne ukazuju na formiranje ovog fenomena.

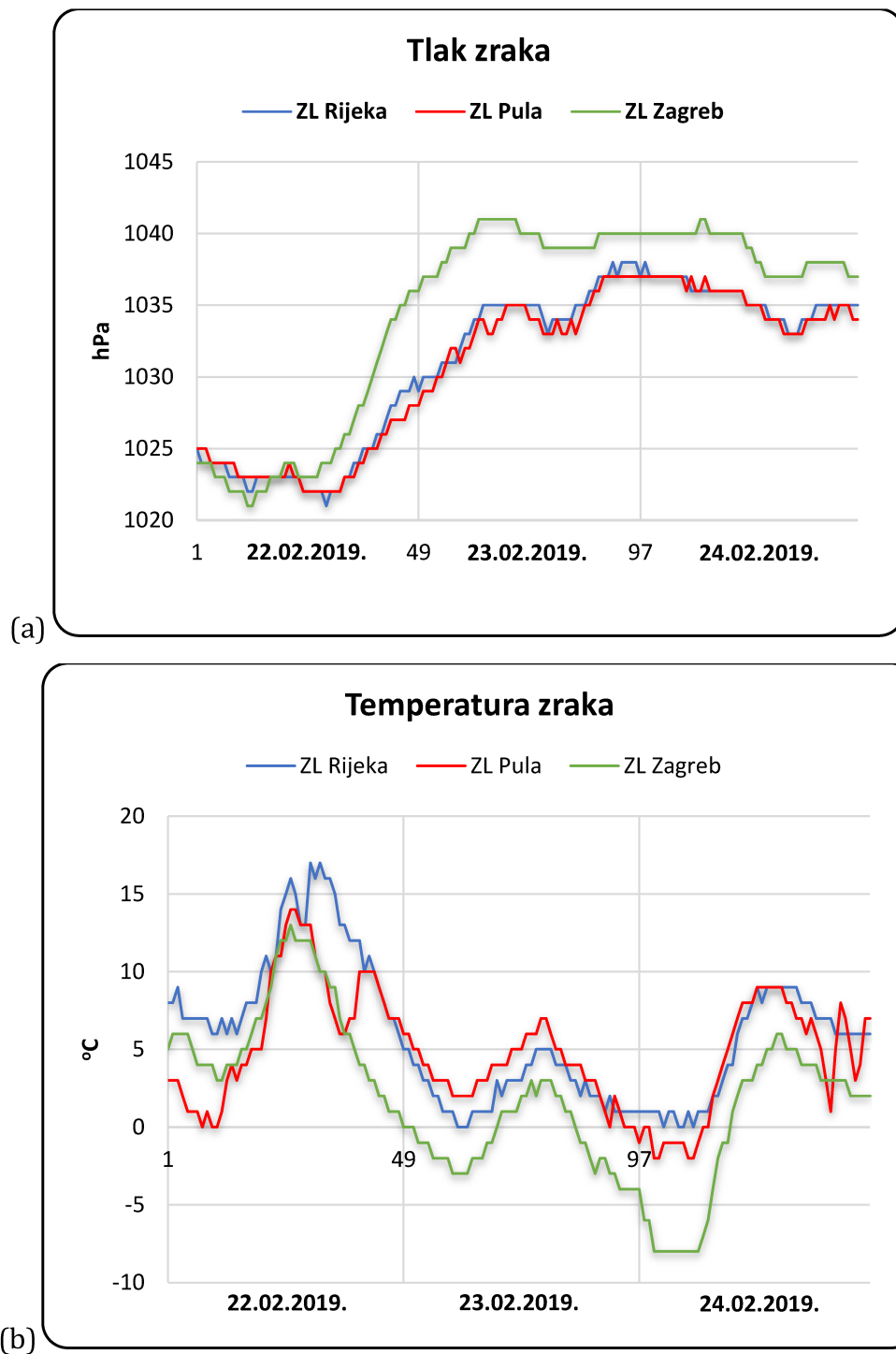


Slika 37. Obradena fotografija koja prikazuje nebo iznad Zračne luke Rijeka u terminu 10:55 UTC, 28. studenoga 2018. (pojačani kontrasti, povećana zasićenost boja, zumirana formacija oblaka)

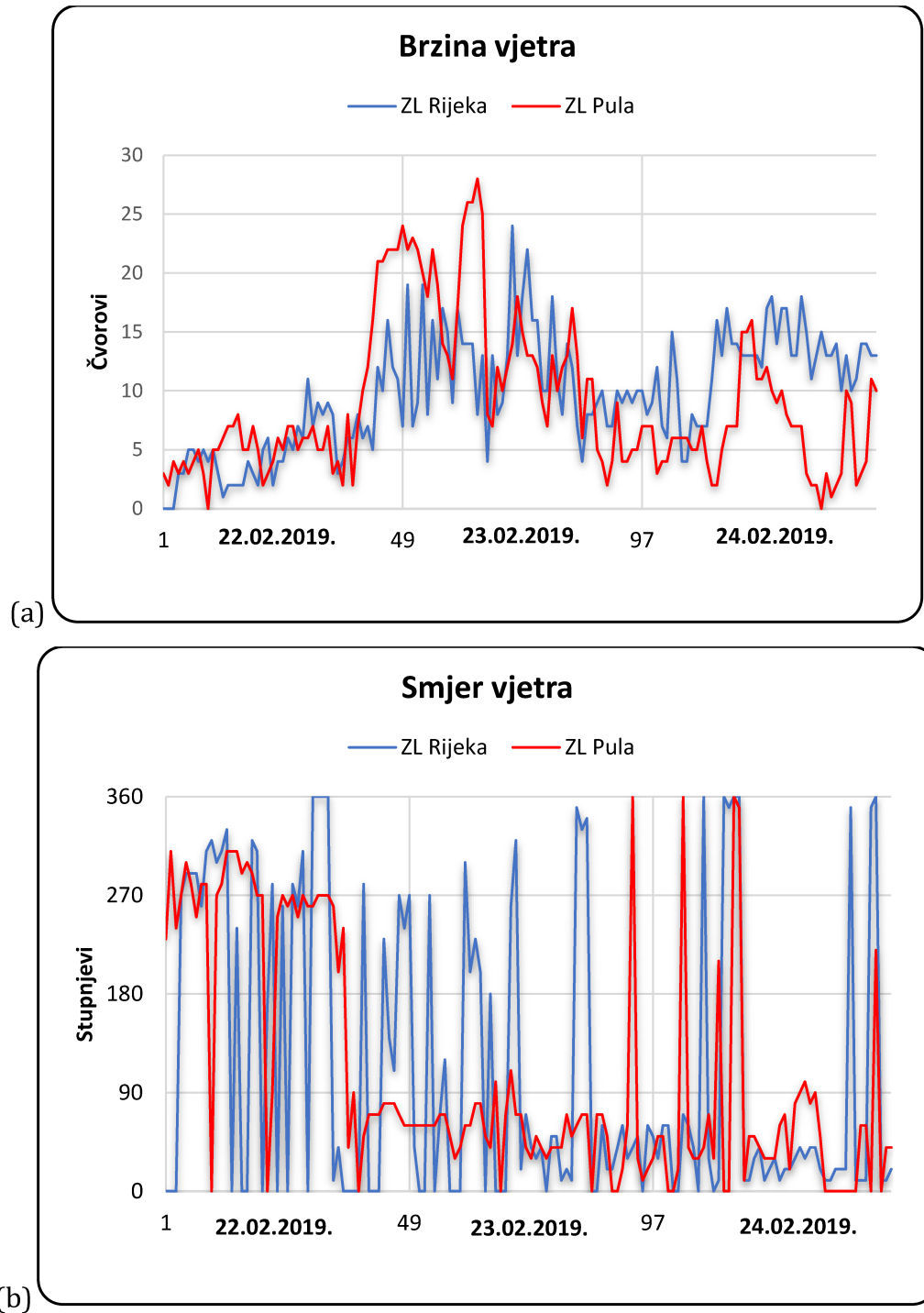
Promotrimo li fotografiju neba nastalu ujutro 28. studenoga 2018. formacija oblaka ukazuje na rotor bez obzira što je zabilježen jak vjetar (slika 37). Kod ovog slučaja pretpostavka je da se dogodio pomak osi rotora prema otvorenom moru i to nakon podneva, 28. studenoga 2018. Os rotora je prešla preko mjerne postaje prema zapadu i nakon toga postaja počinje bilježiti vjetar sjeveroistočnog smjera, tj. počinje puhati bura stalnog smjera na području ZL Rijeka.

4.3.3. Suhi rotor

Treći i zadnji razmatrani rotor se dogodio u zimi i to 23. veljače 2019. Tom prilikom izmjeren je vrlo visoki tlak iznad ZL Zagreb, a nešto niži na području ZL Rijeka i ZL Pula, što ukazuje na anticiklonalnu buru (slika 38a). Istovremeno bilježimo veliki pad temperature, koji počinje krajem 22. veljače 2019. (slika 38b) i ukazuje na prodor hladne zračne mase s kontinenta smanjujući maksimanu temperaturu zraka za 10-ak stupnjeva °C. Prema podacima mjerenog vjetra, bura počinje puhati oko ponoći s 22. na 23. veljače 2019. postižući brzine oko 15 m/s odnosno 12 m/s na postajama ZL Pula i ZL Rijeka u svom maksimumu (slika 39a).



Slika 38. Prikaz (a) tlaka zraka (hPa) reduciranog na razinu mora i (b) temperature zraka (°C) na 2 m iznad tla za Zračnu luku Rijeka i Zračnu luku Pula od 22. do 24. veljače 2019. U jednom danu ima 48 mjerenja (svakih pola sata), ukupno 144 mjerenja u 3 dana.

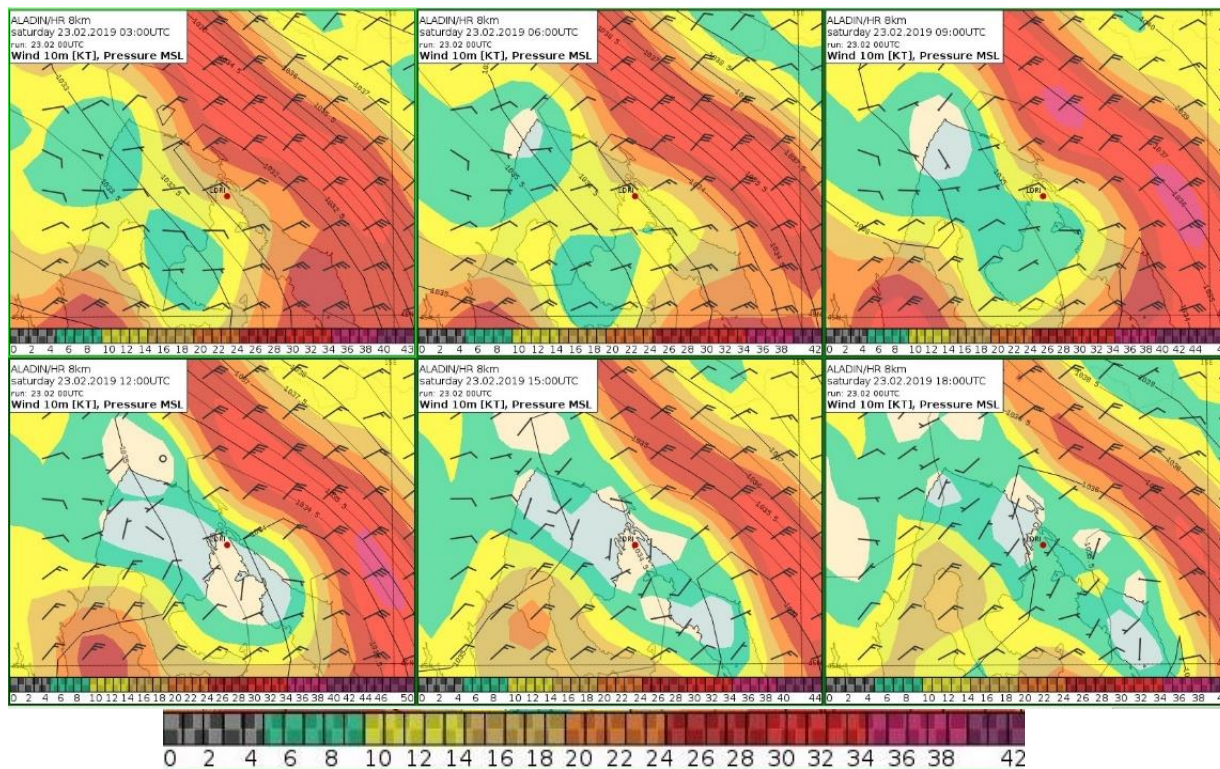


Slika 39. Prikaz (a) brzine vjetra (u čvorovima) i (b) smjera vjetra za Zračnu luku Rijeka i Zračnu luku Pula od 22. do 24. veljače 2019. U jednom danu ima 48 mjerenja (svakih pola sata) što ukupno daje 144 mjerenja u 3 dana. 1 čvor = 0,5144 m/s.

U ovom slučaju ćemo pored analize mjerenja brzine i smjera vjetra (slika 39) promotriti brzine i smjer vjetra koji nam daje ALADIN/HR¹⁰ numerički model za prognozu vremena za područje Kvarnera (slika 40). Vrijednosti smjera i brzine vjetra

¹⁰ ALADIN (franc. Aire Limitée Adaptation dynamique Développement InterNational) je numerički (računalni) modelski sustav za kratkoročnu prognozu vremena visoke razlučivosti.

koju je prognozirao ALADIN/HR model s mrežnim korakom od 8 km ustupio je Državni hidrometeorološki zavod, a vizualizaciju podataka za potrebe ovog rada izradila je HKZP na temelju ustupljenih podataka. Dosadašnje numeričke simulacije dale su prostorne dimenzije rotora od 10 x 10 km s povratnim stujanjem u prvih 300 m u trajanju od nekoliko sati (Telišman Prtenjak i Belušić, 2009). Rotori mogu biti i veći i manji stoga je pitanje u kojoj mjeri ALADIN može „vidjeti“ takve formacije u polju strujanja s obzirom na razlučivost koju ima (8 km).

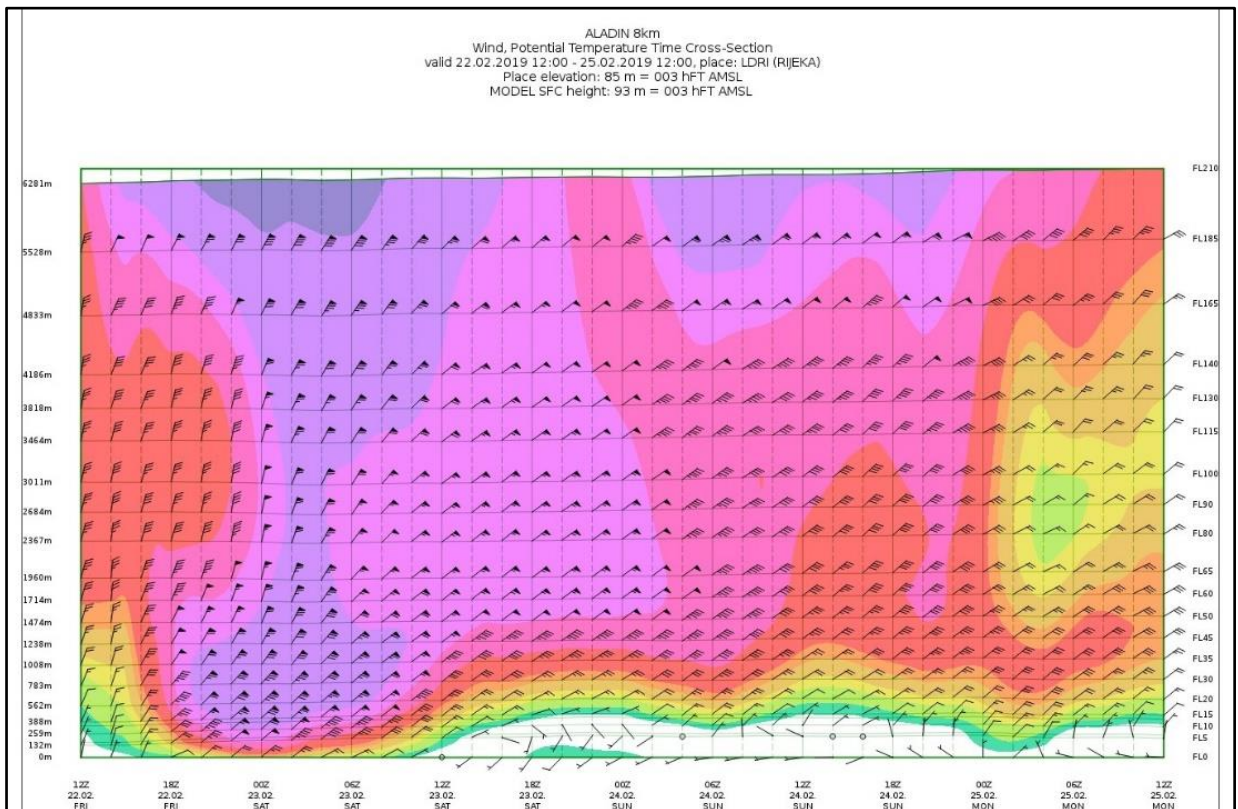


Slika 40. Prognoza horizontalnog vjetra (m/s) za Kvarner izrađena operativnim prognostičkim numeričkim modelom ALADIN/HR s razlučivošću od 8 km za 23. veljače 2019 svaka 3 sata. Boje prikazuju brzinu vjeta u čvorovima. U polju strujanja rotor se može uočiti kao smanjenje brzine vjeta praćeno zakretanjem smjera vjeta. Crvena točka pokazuje položaj postaje Zračne luke Rijeka.

ALADIN/HR relativno je dobro prognozirao smjer i brzinu vjeta (slika 40). Bura je u ZL Pula počela puhati krajem 22. veljače 2019. što je ALADIN/HR dobro prognozirao. Smjer i brzina vjeta izmjerenu u ZL Rijeka model ALADIN/HR je relativno dobro reproducirao u drugoj polovici 23. veljače 2019.; u 15:00 UTC i 18:00 UTC. Također u istom razdoblju ukazuje na zone promjenjivog (nasuprotnog) smjera vjeta buri u blizini zapadne obale otoka Krka što upućuje na pojavu rotora (donje strujanje). Prema modelu uvjeti za stvaranje rotora počinju u 09:00 UTC (iznad Kvarnera), svoj maksimum postiže između 12:00 - 15:00 UTC obuhvaćajući područje oko 20 km uzduž obale te "živi" i nakon 18:00 UTC. S obzirom na navedene dimenzije, ALADIN/HR je uspio „uloviti“ samu strukturu u polju strujanja.



Slika 41. Obrabljena fotografija koja prikazuje nebo iznad Zračne luke Rijeka u terminu 00:56 UTC, 23. veljače 2019. (pojačani kontrasti). Crvena elipsa označava pojavu kumulusa na nebu kao mjere potencijalnog rotora.



Slika 42. Prognoza vertikalnog profila vjetra u vremenu (t-z dijagram) za Zračnu luku Rijeka izrađena prognostičkim modelom ALADIN/HR s razlučivošću 8 km za razdoblje od 22. veljače do 25. veljače 2019.

S obzirom da se radi o anticiklonalnoj buri ne očekuje se pojava naoblake u obalnoj zoni. Fotografije potvrđuju da tijekom svjetlog dijela dana 23. veljače 2019., nije bilo naoblake, jer je zrak bio presuh da bi se formirali oblaci. Tijekom noći (s 22.

na 23. veljače 2019.) kamera je zabilježila formaciju kumulusa koja ukazuje na rotor. Zbog kvalitete fotografije koja je nastala prilikom slabog osvjetljenja, ne možemo detaljno analizirati formaciju oblaka, ali se ona jasno vidi na slici 41.

Simulirani vertikalnog profila vjetra iz ALADIN/HR za ZL Rijeka na slici 42 daje naznake formiranja rotora iznad ZL Rijeka. Nadalje, vidimo da prognoza produžuje rotor, tj. prema prognozi bi on trebao trajati mnogo duže nego što je i trajao. Visina rotora je prema ALADINU/HR oko 400. Podnica kumulusa koji razmatramo i koje smo razmatrali u prethodnim poglavljima je minimalno 800m, tako da se postavlja pitanje točnosti njegove visine u ALADIN/HR modelu. Unatoč ograničenjima modela, ALADIN/HR je relativno uspješno reproducirao pojavu rotora iznad ZL Rijeka u ovom slučaju. Ipak, za što pouzdanije analize rotora potrebno je provesti sveobuhvatno istraživanje rezultata numeričkih simulacija i mjerenih vrijednosti prilikom pojave rotora na području ZL Rijeka da bi se dala objektivna ocjena uspješnosti prepoznavanja rotora u modelu ALADINA/HR. Pritom treba uvažiti činjenicu da se novija verzija operativnog numeričkog prognostičkog modela poboljšava uvođenjem finijeg razlučivanja od dosadašnjeg.

5. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada je bio da se uz pomoć danas dostupnih mjerenja i metoda pokaže postojanje „Mohorovičićevog“ rotora na području Bakarskog zaljeva te da se istraže neka njegova obilježja. U tu svrhu izvršena je analiza Mohorovičićevih zapažanja koja su predstavljala temelj na kojima se definirala daljnja analiza: (i) prizemnih mjerenja s tri postaje s čestom registracijom meteoroloških varijabli u vremenu, (ii) fotografija naoblake te (iii) rezultatima trenutno operativnog numeričkog modela za prognozu vremena ALADIN/HR.

Na temelju analize opažanja koje je napravio Mohorovičić (1888a), kao i rijetkih numeričkih simulacija (npr. Telišman Prtenjak i Belušić, 2009) bilo je potrebno definirati osnovnu duljinu razdoblja i gustoću zapisa tj., relevantnost ulaznih mjerenja potrebnih za razlučivanje rotora. Kako je očekivano trajanje rotora nekoliko sati, odabrane su mjerne postaje zračna luka Rijeka (ZL Rijeka), zračna luka Pula (ZL Pula) i zračna luka Zagreb (ZL Zagreb), zbog njihovih geografskih položaja, klimatskih obilježja te učestalosti mjerenja.

Klimatološka analiza podataka o tlaku, smjeru i brzini vjetra te temperaturi zraka na sve tri postaje rezultirala je izradom algoritma za detekciju rotora. Sam algoritam je uvažavajući strogoću zahtjeva pojedinih selekcijskih kriterija morao biti dovoljno propustljiv za selekciju potencijalnih dana s rotorima uz minimalnu pojavu šuma (lažnih slučajeva). Na kraju kriteriji koji su činili algoritam su bili sljedeći:

- U ZL Pula puše vjetar iz smjerova NNE do E;
- Barem jedno mjerenje u danu gdje je razlika u brzini vjetra u ZL Pula veća ili jednaka 10 čvorova od one u ZL Rijeka;
- Vjetar u ZL Rijeka puše iz smjerova od SE do WNW;
- U ZL Zagreb se mjeri jednak ili viši tlak od 2 hPa nego u ZL Rijeka.

Algoritam je omogućio da se iz velikog broja mjerenja za tri lokacije u razdoblju od 5234 dana izdvoji 350 dana u kojima se pojavio barem jedan skup mjerenja koja zadovoljavaju sve kriterije. Mjerenja nastala u trodnevnom razdoblju (detektirani dan te dan prije i poslije) u kojem se pojavio izdvojeni skup su dalje analizirana te je procijenjeno trajanje pogodnih uvjeta za stvaranje rotora.

Kada je to bilo moguće, odabrani slučajevi su provjeravani fotografijama područja na kojima je morala biti registrirana kompleksna formacija kumulusa (Cu). Formacija je trebala ukazivati na male Cu koji se formiraju i gibaju prema centralnom, većem Cu te na kraju spajaju s njim. Također su na zadnjoj strani centralnog Cu trebali biti prisutni manji oblačići koji se otkidaju od njega te putuju prema dolje i nestaju.

Tri dodatno analizirana slučaja kao rezultat algoritma su pokazala da su rotori dinamična struktura u prostoru i vremenu za čiji nastanak su potrebni specifični vremenski uvjeti zajedno s specifičnom konfiguracijom terena (pojava hidrauličkog skoka kod bure) i prisustvom mora. Zbog velikog broja uvjeta koji moraju biti zadovoljeni da bi nastao rotor, njihova učestalost, kao i trajanje je relativno mala te ne postoji veliki broj lokacija na kojima se oni mogu formirati. Analiza operativnog numeričkog modela ALADIN/HR je pokazala da ako je rotor dovoljno velik može biti "uhvaćen" i s korištenom operativnom verzijom modela (mrežni korak je 8 km). Dobro poznavanje rotora je poželjno zbog toga što rotor može biti povezan s velikm vrtloženjem i pojavom ponekad izraženije turbulentne kinetičke energije. Obje pojave imaju znatne efekte u prometu osobito u onom zračnom utječući na sigurnost polijetanja ili slijetanja aviona na uzletno-sletnu stazu.

Da bi se detaljno proučili rotori, u budućnosti bi bilo potrebno da se pored mjerenja u ZL Pula na području Bakarskog zaljeva postave uređaji za daljinsko mjerenje vjetra (eng. *wind profiler*¹¹) čija bi se mjerenja iskoristila u svrhu izrade detaljnog 3D profila rotora. Tada bi se stvorila baza podataka dovoljno dobra da bi se mogle testirati teorije koje opisuju nastanak i obilježja rotora.

¹¹ Profiler vjetra (eng. *wind profiler*) je vrsta opreme za promatranje vremenskih uvjeta koja koristi radarske valove za mjerenje brzine i smjera vjetra na različitim visinama iznad zemlje.

6. LITERATURA

- Bajić, A. (1989): Severe bora on the Northern Adriatic. Part I: Statistical analysis. *Hrvatski meteorološki časopis*, **24**, 1-9
- Belušić, D., et al. (2013): Wind Regimes Associated with a Mountain Gap at the Northeastern Adriatic Coast. *Journal of Applied Met. and Climatology*, **52**, 2089-2105
- Doyle, J.D., i Durran, D.R. (2002): The dynamics of mountain-waveinduced rotors. *J. Atmos. Sci.*, **59**, 186–201
- Doyle, J.D. i Durran, D.R. (2004): THE MAP ROOM: Recent development in the theory of atmospheric rotors, *Bull.Amer.Meteor.Soc.*, **85**, 337-342
- Doyle, J.D., i Durran, D.R. (2007): Rotor and subrotor dynamics in the lee of three dimensional terrain. *J. Atmos. Sci.*, **64**, 4202–4221
- Egger, J. (1990): Thermally forced flows: theory. Atmospheric Processes Over Complex Terrain (ed. W. Blumen). *Am. Meteorol. Soc.*, 43–57, 323 str.
- Farmer, D. M., i Armi, L. (1999): Stratified flow over topography: the role of small-scale entrainment and mixing in flow establishment. *Proc. Roy. Soc. London A*, **455**, 3221–3258
- Grisogono, B., i Belušić, D. (2009): A review of recent advances in understanding the meso- and micro-scale properties of the severe Bora wind. *Tellus A*, **61**, 1–16
- Grisogono, B., i Oerlemans, J. (2001): Katabatic flow: analytic solution for gradually varying eddy diffusivities. *J. Atmos. Sci.*, **58**, 3349–3354
- Grubišić, V. (2004): Bora-driven potential vorticity banners over the Adriatic. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **130**, 2571–2603
- Grubišić, V., i Orlić, M. (2007): Early observations of rotor clouds by Andrija Mohorovičić. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **88**, 693-700
- Gohm, A., i Mayr, G. (2006): Numerical and observational case-study of a deep Adriatic bora. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **131**, 1363 - 1392
- Hertenstein, R. F., i Kuettner, J. P. (2005): Rotor types associated with steep lee topography: Influence of the wind profile. *Tellus*, **57A**, 117–135
- Horvath, K., et al. (2008): Classification of cyclone tracks over the Apennines and the Adriatic Sea. *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 2210–2227
- Kuzmić, M., et al. (2013): TerraSAR-X observations of the northeastern Adriatic bora: Early results. *Acta Adriatica : International journal of Marine Sciences*, **54**, 13-26
- Lisac, I. (1984): The wind in Zagreb (a contribution to the knowledge of climate of the city of Zagreb, II). *Geofizika 1*, 47–134

- Mohorovičić, A. (1888): Wolkenmessung. *Meteor. Z.*, **23**, 326-327
- , 1889a: Interessante Wolkenbildung uber der Bucht von Buccari (with a comment from the editor J. Hann). *Meteor. Z.*, **24**, 56-58
- , 1889b: Wolkenbeobachtungen in Buccari. *Meteor. Z.*, **24**, 202-261
- , 1889c: Nekoliko opažanja o vertikalnoj komponenti gibanja oblaka. *Rad JAZU*, **95**, 202 – 216.
- , 1891: Nekoji rezultati opažanja oblaka na kraljevskoj nautičkoj školi u Bakru – Na temelju opažanja A. Mohorovičića i A. M. Zuvičića. *Rad JAZU*, **104**, 1-86
- Penzar, B., et al. (2001): Vrijeme i klima hrvatskog Jadrana. Nakladna kuća «Dr. Feletar», Hrvatski hidrografski institut Split, Zagreb, 258 str.
- Skoko, D., i Mokrović, J. (1982): Andrija Mohorovičić. *Školska knjiga*, 147 str.
- Smith, R. B. (1987): Aerial observations of the Yugoslavian Bora. *J. Atmos. Sci.*, **44**, 269–297
- Sheridana, P.F., i Vosper, S.B. (2006): A flow regime diagram for forecasting lee waves, rotors and downslope winds. *Meteorol. Appl.*, **13**, 179–195
- Stiperski, I., et al. (2012): Complex bora flow in the lee of Southern Velebit. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **138**, 1490-1506
- Telišman Prtenjak, M., Grisogono, B. i Nitis, T. (2006): Shallow mesoscale flows at the north-eastern Adriatic coast. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **132**, 2191-2216
- Telišman Prtenjak, M. i Grisogono, B. (2007): Sea/land breeze climatological characteristics along the northern Croatian Adriatic Coast. *Theoretical and Applied Climatology*, **90**, 3-4, 201-215
- Telišman Prtenjak, M., i Belušić, D. (2009): Formation of reversed lee flow over the north-eastern Adriatic during Bora. *Geofizika*, **26**, 145–155
- Telišman Prtenjak, M., et al. (2010): Sea-land breeze development during a summer bora event along the north-eastern Adriatic coast. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **136**, 1554-1571
- Telišman Prtenjak, M., et al. (2015): Impact of mesoscale meteorological processes on anomalous radar propagation conditions over the northern Adriatic area. *Journal of Geophysical Research - Atmospheres*, **120** (17), 8759-8782
- Večenaj, Ž., et al. (2012): Along-Coast Features of Bora-Related Turbulence. *Boundary-Layer Meteorology*, **143**, 527–545

- Vosper, S. B. (2004): Inversion effects on mountain lee waves. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **130**, 1723–1748
- Whiteman, C. D. (2000): Mountain Meteorology: Fundamentals and Applications. *Oxford University Press, New York*, 355 str.
- WMO, (2011): Regional Codes and National Coding Practices, Volume II. *World Meteorological Organization*, 22 str.
- Yoshino, M.M. (1976): Local Wind Bora. *University of Tokyo Press*, 289 str.
- Zängl, G., i Hornsteiner, M. (2007): Can trapped gravity waves be relevant for severe foehn windstorms? A case study. *Meteorol. Z.*, **16**, 203–212

Prilog A

Meteorološki ključ METAR

METAR je oblik kodiranog meteorološkog izvještaja. Ime METAR potiče iz francuskog jezika, od skraćenog naziva MÉTéorologique Aviation Régulière (message d'observation météorologique régulière pour l'aviation), redoviti vremenski izvještaj za zrakoplovstvo.

Kao svjetski standard usvojen je 1996. godine. Mahom ga koriste piloti u sklopu priprema za let i meteorolozi za izradu prognoza vremena. Relativno je lak za razumijevanje, jer se koriste skraćene engleske riječi.

Osnovna struktura METAR izvještaja (WMO, 2011):

Tip	ID	Vrijeme	Vjetar	Vidljivost	Uvjeti	Nebo	T/Tr	Tlak	Napomene
METAR	LDPL	041630Z	19020G26KT	5000	-SHRA	BKN110	12/08	Q1016	RMK AO2

- LDPL – Identifikacija (ID) stanice: Identificiranje stanice sastoji se od 4 slova (ili 2 broja u postupku registracije aerodroma). Načelno, prvo slovo je oznaka kontinenta ili grupe država u okviru kontinenta. Drugo slovo predstavlja državu u toj regiji, a posljednja dva slova označavaju određeni aerodrom.
- 041630Z – Datum i vrijeme: 04 - Datum u mjesecu, 1630 - Vrijeme promatranja, Z - Označava vrijeme zone "Z", odnosno UTC.
- 19020G26KT – Vjetar: 190 (prva tri broja) označavaju pravac vjetra iskazan u stupnjevima (0 do 360), 20 (sljedeća dva broja) su brzina vjetra iskazana u čvorovima (1 čv = 1 NM/h = 1,852 km/h = 0,5144 m/s), G26 predstavlja nalet vjetra (en. Gust). U ovom slučaju nalet je 26 čvorova (nalet vjetra se ne prikazuje redovito u izvještaju, već samo pri ispunjenju određenog kriterija), KT - Čvor, anglosaksonska jedinica za brzinu. Za vjetar s brzinom manjom od 6 čvorova može se javiti grupa VRB05KT (VRB umjesto stupnja) koja označava da je pravac vjetra promjenjiv. To je ono što se u prognozama navodi kao "slab vjetar promjenljivog pravca". Za vjetar s brzinom većom od 6 čvorova može se pojaviti i 18015KT 150V210. Vjetar je iz pravca 180 stupnjeva jačine 15 čvorova, ali je stvarni pravac promjenjiv između 150 i 210 stupnjeva. Da bi vjetar preko 6 čvorova bio promjenjiv, mora imati otklon od najmanje 60 stupnjeva.
- 5000 – Vidljivost: vidljivost je iskazana u metrima: 5000 m. 9999 označava vidljivost preko 10 km. Iza grupe vidljivost može se javiti podgrupa "Vidljivost na pisti" (Runway Visual Range ili RVR). Ova grupa se javlja ako je vidljivost ispod 1 milje. Oznaka podgrupe je R iza koga slijedi dvoznamenkasta oznaka

piste, a iza kose crte je četveroznamenkast broj koji predstavlja horizontalnu vidljivost iskazanu u metrima. Na primjer, R05/0800 označava da je na pisti "05" vidljivost 800 metara. Ako su vrijednosti vidljivosti izvan granica izvještavanja, mogu se ispred vrijednosti dodati slova M (ispod) ili P (iznad). Na primjer, R05/M0100 bi značilo da je na pisti "05" vidljivost manja od 100 metara. Nedostajući podatak će se kodirati kao R23///// (4 kose crte).

- -SHRA - Trenutačni uvjeti: (-) označava slab intenzitet, umjeren() ili jak (+) zavisno od određenih kriterija. Pojednostavljeno, to je intenzitet snijega, kiše, tuče itd. SH je pljusak, a RA označava kišu. Znači, trenutno je slab pljusak (kiše).
- BKN110 - Stanje neba: BKN - Pretežno oblačno (pokrivenost neba oblacima od 5/8 do 7/8), 110 predstavlja visinu oblaka od 11000 stopa (1 stopa = 0,3 m). Oblačnost može biti FEW (pretežno vedro, pokrivenost 1/8 do 2/8), SCT (djelomično oblačno, 3/8 do 4/8), BKN (pretežno oblačno, 5/8 do 7/8) i OVC (oblačno, 8/8), često se može naći i više od jednog opisa. Oznake za su TCU (Towering Cumulus), CB (Cumulonimbus) ili ACC (Alto cumulus Castellanus) i nalaze se na kraju kategorije (npr. SCT035TCU). Vedro nebo se označava sa SKC ili CLR (oblačnost 0/8), ili sa CAVOK (en: Ceiling And Visibility OKay).
- 12/08 - Temperatura i rosište: 12 - Predstavlja temperaturu u °C, 08 - Predstavlja rosište u °C. Ako temperatura ili rosište padnu ispod nule, ispred grupe će se naći slovo "M" (tj. 03/M02). "M" znači minus
- Q1016 - Tlak: Q - Označava da se radi o svedenom tlaku na razinu mora, 1016 - Tlak iskazan u hPa.

Prilog B

Popis dana s najmanje jednim skupom mjerenja koja ukazuju na pojavu rotora

Datum	Br. mjerenja
19.1.2005.	3
26.1.2005.	2
17.2.2005.	1
21.2.2005.	1
23.2.2005.	1
27.2.2005.	1
13.3.2005.	1
31.3.2005.	1
1.4.2005.	1
2.4.2005.	3
28.4.2005.	3
8.5.2005.	8
12.5.2005.	8
24.5.2005.	1
31.5.2005.	2
1.6.2005.	2
6.6.2005.	2
20.7.2005.	2
2.8.2005.	3
31.8.2005.	2
30.9.2005.	1
5.10.2005.	1
10.10.2005.	1
11.10.2005.	9
17.11.2005.	1
22.11.2005.	2
4.1.2006.	1
7.1.2006.	1
12.1.2006.	8
24.1.2006.	1
1.2.2006.	4
18.3.2006.	3
6.4.2006.	1
5.5.2006.	4
1.6.2006.	1
2.6.2006.	1
3.7.2006.	1
4.7.2006.	3
5.7.2006.	5

8.9.2006.	3
9.9.2006.	1
26.9.2006.	2
27.9.2006.	1
6.10.2006.	3
8.10.2006.	3
9.10.2006.	1
14.10.2006.	1
15.10.2006.	1
30.10.2006.	1
19.12.2006.	1
20.12.2006.	1
21.12.2006.	1
12.3.2007.	2
13.3.2007.	1
15.3.2007.	3
25.3.2007.	3
30.3.2007.	2
4.4.2007.	2
5.4.2007.	2
11.4.2007.	2
12.4.2007.	4
19.4.2007.	1
26.4.2007.	2
26.4.2007.	3
5.6.2007.	1
25.7.2007.	2
26.7.2007.	1
1.9.2007.	3
2.9.2007.	1
4.9.2007.	2
6.10.2007.	1
7.10.2007.	1
13.10.2007.	1
14.10.2007.	1
21.10.2007.	1
22.10.2007.	2
1.11.2007.	1
2.11.2007.	1
3.11.2007.	1

17.11.2007.	3
13.12.2007.	2
15.12.2007.	2
27.12.2007.	3
31.12.2007.	3
4.1.2008.	1
25.1.2008.	2
28.1.2008.	4
18.3.2008.	4
19.3.2008.	2
20.3.2008.	1
10.5.2008.	1
11.5.2008.	1
20.5.2008.	2
28.6.2008.	4
21.7.2008.	3
22.7.2008.	2
26.8.2008.	1
27.8.2008.	3
30.8.2008.	1
13.9.2008.	1
10.10.2008.	1
13.10.2008.	1
17.10.2008.	1
13.11.2008.	1
14.11.2008.	2
17.11.2008.	2
15.12.2008.	1
25.12.2008.	1
27.12.2008.	2
5.3.2009.	2
20.3.2009.	3
21.3.2009.	2
5.5.2009.	1
28.5.2009.	1
4.6.2009.	1
17.6.2009.	3
26.7.2009.	2
31.7.2009.	4
22.8.2009.	1

Obilježja atmosferskih ("Mohorovičićevih") rotora na Kvarneru

31.8.2009.	1
25.9.2009.	2
26.9.2009.	2
3.10.2009.	1
9.11.2009.	2
5.12.2009.	1
23.1.2010.	1
5.3.2010.	2
10.4.2010.	1
17.4.2010.	4
26.4.2010.	3
7.7.2010.	5
28.8.2010.	2
5.9.2010.	4
10.9.2010.	2
18.9.2010.	1
29.9.2010.	2
11.10.2010.	1
25.12.2010.	1
22.1.2011.	1
2.2.2011.	2
3.2.2011.	5
21.3.2011.	1
10.4.2011.	3
27.4.2011.	1
18.5.2011.	3
25.5.2011.	1
30.5.2011.	3
4.6.2011.	1
12.7.2011.	2
9.8.2011.	1
16.8.2011.	5
17.8.2011.	2
6.9.2011.	1
23.9.2011.	6
26.9.2011.	1
27.9.2011.	3
30.9.2011.	3
14.10.2011.	1
9.3.2012.	1
8.4.2012.	1
14.4.2012.	3
22.6.2012.	2
26.6.2012.	9
13.7.2012.	1

21.7.2012.	2
11.8.2012.	1
17.8.2012.	1
19.8.2012.	2
26.8.2012.	1
3.9.2012.	1
8.9.2012.	5
9.9.2012.	2
15.9.2012.	3
20.9.2012.	2
8.10.2012.	6
30.11.2012.	1
16.1.2013.	2
24.1.2013.	2
25.1.2013.	1
27.2.2013.	4
14.3.2013.	1
23.3.2013.	1
1.4.2013.	1
5.5.2013.	2
26.6.2013.	2
27.6.2013.	6
7.7.2013.	1
8.7.2013.	1
12.7.2013.	2
14.7.2013.	2
18.7.2013.	2
22.7.2013.	2
5.8.2013.	1
22.8.2013.	1
25.8.2013.	1
11.9.2013.	6
19.9.2013.	3
8.10.2013.	1
31.10.2013.	4
5.12.2013.	4
27.1.2014.	2
8.3.2014.	1
11.3.2014.	1
9.4.2014.	5
16.6.2014.	1
25.8.2014.	1
28.8.2014.	4
2.9.2014.	2
17.9.2014.	1

4.10.2014.	1
26.10.2014.	2
31.10.2014.	1
9.12.2014.	3
17.12.2014.	2
28.12.2014.	1
24.1.2015.	1
25.1.2015.	1
16.2.2015.	2
22.2.2015.	1
25.3.2015.	3
14.4.2015.	1
18.4.2015.	2
29.4.2015.	1
7.5.2015.	2
15.5.2015.	2
17.5.2015.	3
18.5.2015.	6
5.6.2015.	4
8.6.2015.	1
9.7.2015.	1
26.7.2015.	7
9.8.2015.	2
20.9.2015.	2
21.9.2015.	1
24.9.2015.	2
29.9.2015.	1
2.10.2015.	1
9.10.2015.	1
11.10.2015.	2
21.10.2015.	8
26.10.2015.	1
31.10.2015.	1
23.11.2015.	1
26.11.2015.	2
16.1.2016.	2
24.2.2016.	2
27.2.2016.	3
3.3.2016.	2
12.3.2016.	2
19.4.2016.	2
24.4.2016.	1
28.4.2016.	1
15.5.2016.	4
22.6.2016.	1

Obilježja atmosferskih ("Mohorovičićevih") rotora na Kvarneru

23.6.2016.	8
4.7.2016.	12
1.8.2016.	3
7.8.2016.	1
8.8.2016.	1
10.8.2016.	1
26.8.2016.	1
30.8.2016.	2
31.8.2016.	9
7.9.2016.	2
9.10.2016.	1
15.10.2016.	1
26.10.2016.	1
27.10.2016.	1
3.11.2016.	3
28.11.2016.	1
27.12.2016.	1
3.1.2017.	4
19.1.2017.	3
20.1.2017.	1
6.2.2017.	1
7.2.2017.	1
25.2.2017.	4
11.4.2017.	2
12.4.2017.	2
17.4.2017.	1
23.4.2017.	4
30.4.2017.	1
25.5.2017.	1
5.6.2017.	5
7.6.2017.	1
17.6.2017.	7

5.8.2017.	2
6.8.2017.	10
21.8.2017.	1
2.9.2017.	2
8.9.2017.	1
11.9.2017.	1
25.9.2017.	3
27.9.2017.	2
28.9.2017.	2
6.10.2017.	6
30.10.2017.	5
7.11.2017.	2
14.11.2017.	5
15.11.2017.	1
17.11.2017.	2
2.12.2017.	1
13.1.2018.	8
14.1.2018.	1
3.2.2018.	1
6.2.2018.	4
10.2.2018.	2
12.2.2018.	2
21.2.2018.	1
17.3.2018.	1
20.3.2018.	1
22.3.2018.	2
23.3.2018.	3
6.4.2018.	3
17.4.2018.	1
18.4.2018.	2
21.5.2018.	2
22.6.2018.	2

30.6.2018.	2
12.8.2018.	1
25.8.2018.	1
26.8.2018.	1
28.8.2018.	6
31.8.2018.	2
24.9.2018.	2
29.9.2018.	5
4.10.2018.	3
5.10.2018.	1
9.10.2018.	2
10.10.2018.	3
13.10.2018.	1
21.10.2018.	3
24.10.2018.	1
4.11.2018.	2
14.11.2018.	7
17.11.2018.	1
19.11.2018.	1
27.11.2018.	4
28.11.2018.	2
13.12.2018.	1
18.1.2019.	4
24.1.2019.	1
28.1.2019.	1
6.2.2019.	4
22.2.2019.	4
23.2.2019.	6
11.3.2019.	1
22.3.2019.	4
23.3.2019.	1
28.3.2019.	1