

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
GEOFIZIČKI ODSJEK

Endi Keresturi

OSOBINE BURE NA ZRAČNOJ LUCI  
DUBROVNIK

Diplomski rad

Zagreb, 2014.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
FIZIČKI ODSJEK

SMJER: METEOROLOGIJA I FIZIČKA OCEANOLOGRAFIJA

**Endi Keresturi**

Diplomski rad

## **Osobine bure na zračnoj luci Dubrovnik**

Voditelj diplomskog rada: prof. dr. sc. Branko Grisogono

Suvoditelj diplomskog rada: dr. sc. Željko Večenaj

Zagreb, 2014.

Zahvaljujem dr. sc. Željku Večenaju i prof. dr. sc. Branku Grisogonu na korisnim savjetima.

Također, zahvaljujem Igoru Kosu i Jadranu Jurkoviću na usmjeravanju i konstruktivnim raspravama.

Zahvaljujem i Hrvatskoj kontroli zračne plovidbe d.o.o. na ustupljenim podacima.

## Sadržaj

|                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| Popis kratica .....                                                         | 1  |
| 1. Uvod.....                                                                | 2  |
| 2. Osnovna obilježja bure na aerodromu u Dubrovniku .....                   | 3  |
| 3. Podaci .....                                                             | 6  |
| 4. Metodologija .....                                                       | 7  |
| 5. Rezultati .....                                                          | 12 |
| 5.1. Uspješnost algoritma i modela.....                                     | 12 |
| 5.2. Klimatologija bure .....                                               | 13 |
| 5.3. Usporedba SM-bure i N-bure .....                                       | 20 |
| 5.4. Usporedba podataka iz pseudotempa s podacima iz METAR izvještaja ..... | 33 |
| 6. Zaključak.....                                                           | 43 |
| Dodatak.....                                                                | 45 |
| Literatura .....                                                            | 51 |

## **Popis kratica**

ET1 – Empirijska teza br. 1

ET2 – Empirijska teza br. 2

IQR – Interkvartilni raspon

U<sub>10</sub> – Desetominutne srednje brzine iz METAR izvješća

U25 – Uzorak od 25 SM-bura

ZLD – Zračna luka Dubrovnik

## 1. Uvod

Sam spomen bure većinu ljudi asocira na jak vjetar i hladnoću. Službeno najjači udar bure izmjeren je 12. 12. 1998. g. na Masleničkom mostu i iznosio je  $69 \text{ m s}^{-1}$  ili  $248 \text{ km h}^{-1}$  (Vučetić i Vučetić, 2002). Najjednostavniji i najučestaliji opis bure glasi otprilike ovako: bura je hladan, mahovit i pretežno suh vjetar koji puše na istočnoj obali Jadrana (npr. Gelo, 2005). Mnogo detaljniji opis bure kao i njenih dinamičkih aspekata dan je u Grisogono i Belušić (2009) te Bašić (2010). Iako mi buru volimo zvati „našim fenomenom“, treba napomenuti da to baš i nije sasvim tako. Kao prvo, bura puše duž cijele istočne obale Jadrana što uključuje i naše susjedne zemlje. Drugo, dinamički slični vjetrovi javljaju se i drugdje u svijetu. Neki od najpoznatijih su *novorosijska bura* koji puše istočnim obalama Crnog mora, *novozemaljska bura* s ruskog otoka Nova Zemlja ili meksički *tehuantepecers* te japanski *oroshi* (npr. Sijerković, 2003). Usprkos tome, jadranska bura poznata je u cijelome svijetu pod općeprihvaćenim nazivom *bura*.

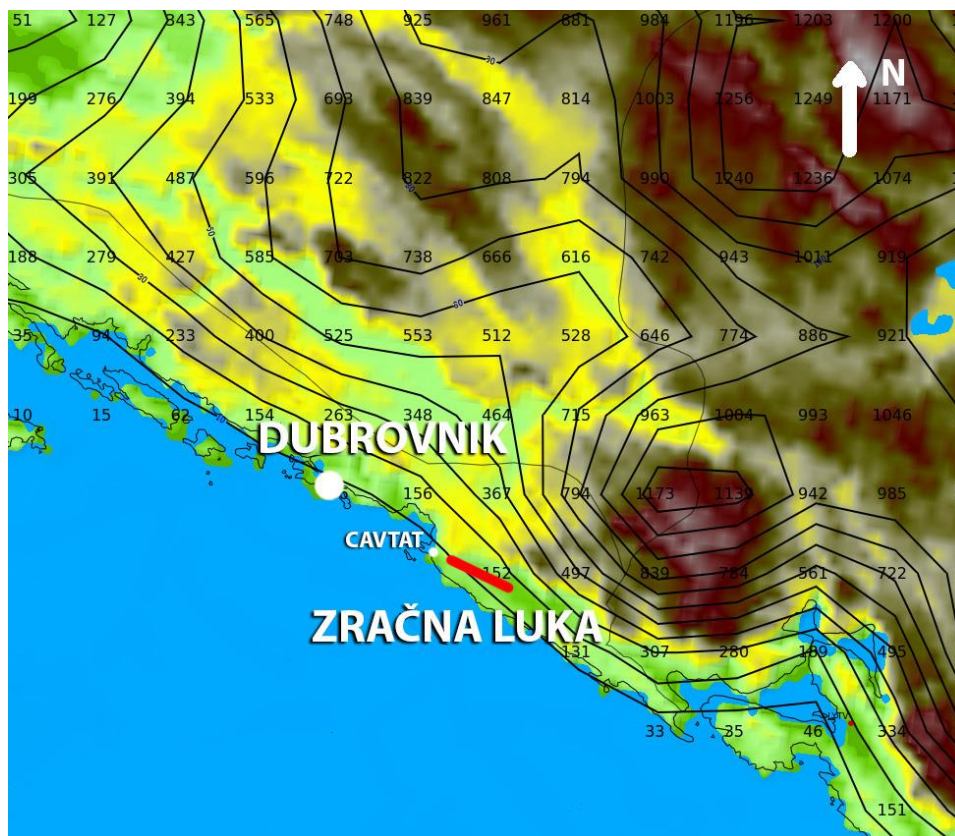
Budući da je u većini naseljenih područja uz jadransku obalu bura najučestaliji vjetar, njeno poznavanje i razumijevanje iznimno je važno za svakodnevni život ljudi toga kraja. Vjerojatno najpoznatija negativna posljedica bure jest ometanje normalnog odvijanja svih oblika prometa. Motivacija ovog rada prisutnost je velikih poteškoća u odvijanju zračnog prometa na zračnoj luci Dubrovnik (ZLD) za vrijeme puhanja bure. Te se poteškoće potencijalno mogu ublažiti poboljšanjem prognoze bure na ZLD-u. U tu će svrhu u ovome radu biti određene glavne osobine bure na tom području, napraviti će se klimatologija bure te će se usporediti mjerenja bure pri tlu s podacima iz numeričkog meteorološkog modela. Dakle, glavni doprinos ovog rada definiranje je razlike između dva tipa bure koja se javljaju na području ZLD-a te davanje kriterija koji će pomoći pri prognoziranju bure na ZLD-u.

## **2. Osnovna obilježja bure na aerodromu u Dubrovniku**

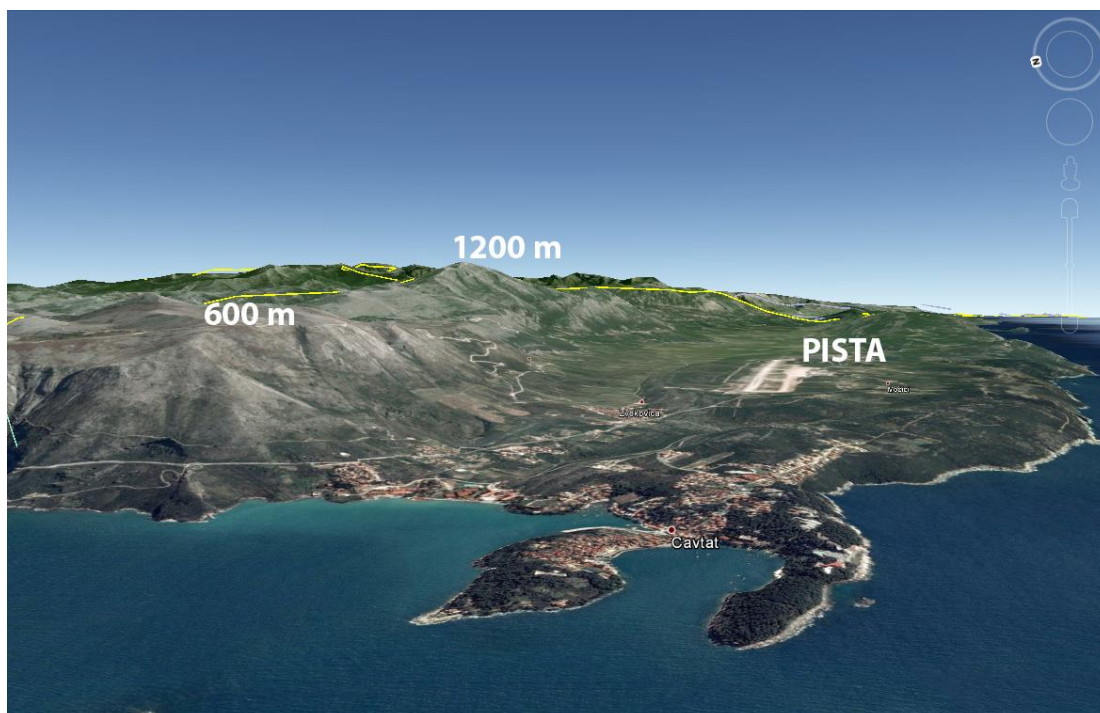
Zračna luka Dubrovnik smještena je uz obalu na nadmorskoj visini od oko 160 m u blizini Cavtata, 16 km jugoistočno od Dubrovnika. Oko 1,5 km jugozapadno omeđena je morem, a na približno istoj udaljenosti sjeveroistočno nalazi se planinski lanac visine između 500 i 1200 m (Sl. 1a, b). Budući da je smjer pružanja piste od sjeverozapada prema jugoistoku (približno paralelno s planinskim lancem), bura puše gotovo okomito na samu pistu. Ta činjenica čini buru vrlo opasnom za zračni promet, pogotovo kod slijetanja i uzlijetanja zrakoplova. Na Slici 2 prikazani su osnovni podaci o stazi kao i položaji dviju meteoroloških stanica; jedna je na sjeverozapadnom prilazu (prag 12), a druga na jugoistočnom (prag 30). U ovom će se radu koristiti podaci s praga 12 kao što je kasnije opisano u poglavlju 4.

Drobac (2006) piše da su Mediteranske ciklone glavni uzrok bure na dubrovačkom području (ciklonalni tip bure). Bura puše na stražnjoj strani ciklone ako se središte ciklone nalazi nad južnim Jadranom ili Egejskim morem. Budući da su prodori ciklona puno učestaliji u hladnom dijelu godine, većina je bura upravo iz tog razdoblja. Bura može biti i anticiklonalnog tipa, ali je taj tip bure na dubrovačkom području puno rjeđi. Drobac je kao primjer naveo 11. 11. 2003. kada se dubrovačko područje nalazi na prednjoj strani istočnoeuropske anticiklone.

Jedna od glavnih karakteristika bure na dubrovačkom području jasna je razlika između tzv. standardnog modela bure (u daljnjem tekstu SM-bura) i otvorene bure (u daljnjem tekstu N-bura gdje N označava sjeverni smjer). Prvi od ova dva tipa javlja se kada bura puše u nižoj troposferi i visina sloja puhanja se može jasno odrediti. Kod drugog se tipa sjeverno strujanje proteže po cijeloj troposferi i jasna granica sloja puhanja ne postoji. Drobac (2006) kao najznačajnije razlike pri tlu između ova dva tipa bure navodi znatno veću srednju brzinu, duže trajanje, manje varijacije smjera i brzine vjetra kod SM-bure u odnosu na N-buru. Unatoč manjoj srednjoj brzini, N-bura ima udare usporedive s onima kod SM-bure. Zbog takvih je osobina N-bura teže predvidiva i puno opasnija za zračni promet. Sve ove tvrdnje će u sklopu ovoga rada biti provjerene.



Slika 1a. Položaj zračne luke (crvena puna linija) u odnosu na gradove Cavtat i Dubrovnik uz prikaz reljefa. Smjer sjevera naznačen je u gornjem desnom kutu.



Slika 1b. Prikaz zračne luke i okolnog reljefa pod određenim kutom (iz smjera približno WNW). Smjer sjevera naznačen je u gornjem desnom kutu, a vrhovi obližnjih planina bijelim slovima. Slika je preuzeta iz programa *Google Earth*.



Slika 2. Satelitski pogled na pistu uz naznačene položaje s geografskim koordinatama meteoroloških postaja na pojedinim pragovima te duljinu same piste. Položaj i koordinate točke iz meteorološkog modela prikazani su dolje u sredini, a nadmorska visina točke iznosi 127 m. Smjer sjevera naznačen je u gornjem desnom kutu.

### 3. Podaci

Na ZLD-u se smjer i brzina vjetra mjere anemografom postavljenim u reprezentativnu točku za prag 12 uz pistu. Korišteni podaci s tog anemografa zapisani su u obliku METAR izvješća kakav se u zrakoplovstvu koristi u operativne svrhe. Iako takvo izvješće sadrži podatke o raznim meteorološkim elementima, za ovaj su rad bitni samo podaci o srednjoj brzini, srednjem smjeru i udarima vjetra. Na raspolaganju imamo METAR izvješća od 28. 11. 2007. g. u 00 UTC do 30. 4. 2014. g. u 23:30 UTC, a razmak između svakog izvješća iznosi 30 min. Treba napomenuti da su nedostajali podaci za siječanj, veljaču i ožujak u 2014. g. Postupak kodiranja podataka u METAR izvješće opisan je u sljedećih nekoliko rečenica. Srednjak brzine i smjera vjetra (zaokruženog na  $10^\circ$ ) izračunat između 15. i 25. minute svakog sata pridružuje se izvješću u 30. minuti (te ćemo brzine u daljnjem tekstu označavati s  $U_{10}$ ). Analogno vrijedi i za period između 45. i 55. minute za izvješće u punom satu. Udar je definiran kao maksimalni iznos brzine u tom desetominutnom periodu, a zapisuje se samo ako je za najmanje  $5 \text{ m s}^{-1}$  veći od pripadnog srednjaka brzine.

Budući da je jedan od ciljeva ovog rada usporedba N-bure sa SM-burom potrebno je procijeniti i dubinu sloja bure (detaljnije opisano u poglavlju 4). Dubina sloja bure ne može se odrediti iz prizemnih podataka kakvi se nalaze u METAR izvješću, već je potreban visinski profil vjetra. U tu svrhu bi najbolji izbor bila radiosondažna mjerenja, ali takva za područje Dubrovnika ne postoje. Stoga, izbor pada na sljedeću najbolju stvar – numerički meteorološki model. U ovom je slučaju to ALADIN (npr. Horvath, 2011). Na raspolaganju imamo satne podatke o srednjoj brzini i smjeru vjetra iz modela za gore navedeno razdoblje koji su organizirani u tzv. pseudotempove. Svaki ALADIN-ov pseudotemp sadrži podatke o temperaturi zraka i rosištu, tlaku zraka te podacima o vjetru za sljedećih 72 sata na 38 visinskih nivoa. Vremenski razmak između pojedinih pseudotempova iznosi 12 sati. Stoga, da ne bi dolazilo do preklapanja podataka, potrebno je odabrati koji će se intervali iz pojedinog pseudotempa uzeti. Kako se pokazalo da model najpouzdanije prognoze daje u nešto kasnijim terminima simulacije, izabran je interval od 12. do 23. sata svakog pseudotempa. Položaj točke modela iz koje su korišteni podaci prikazan je na Slici 2.

#### 4. Metodologija

U ovome poglavlju će ukratko biti opisan način na koji su podaci obrađivani. Prvi korak izdvajanje je svih epizoda bure u promatranom razdoblju (28. 11. 2007. – 30. 4. 2014.). U tu je svrhu potrebno definirati kriterije po kojima će se bura razlikovati od ostalih tipova vjetra. Kriteriji su definirani prema osnovnim karakteristikama bure po smjeru, brzini vjetra i trajanju (npr. Poje, 1995). Sljedeći je korak napisati algoritam koji će ići kroz podatke iz METAR izvješća pokušati identificirati sve epizode bure. Svi postavljeni uvjeti u ovome algoritmu prikazani su u tablici 1. Minimalna brzina od  $6 \text{ m s}^{-1}$  odabrana je kako bi se odmah eliminirao vjetar poput burina ili slabog kopnenjaka smjera  $80^\circ$  koji su karakteristični za prag 12, a sličnog su smjera kao i bura. Kao početak bure, izabran je termin u kojemu je srednja brzina minimalno  $6 \text{ m s}^{-1}$ , a kraj bure kada brzina padne ispod  $6 \text{ m s}^{-1}$  dva termina zaredom. Odabirom ovih uvjeta pokušavalo se ostati što više konzistentno s uvjetima koje je koristio Drobac. Iako je Drobac svoje uvjete temeljio na udarima (brzina udara mora biti minimalno  $10 \text{ m s}^{-1}$ ), u ovome radu to nije bilo moguće jer podaci o udarima u METAR izvješćima nisu kontinuirani. Drugi je uvjet da minimalno trajanje epizode bure iznosi tri sata (Poje, 1995). Uvjet na smjer proširen je s prvog i na drugi kvadrant. Razlog tome je što se u stvarnosti, pogotovo kod N-bure, vrlo često javlja i sjeverozapadni smjer (Drobac, 2006).

Tablica 1. Odabrani uvjeti pri pronalaženju bure.

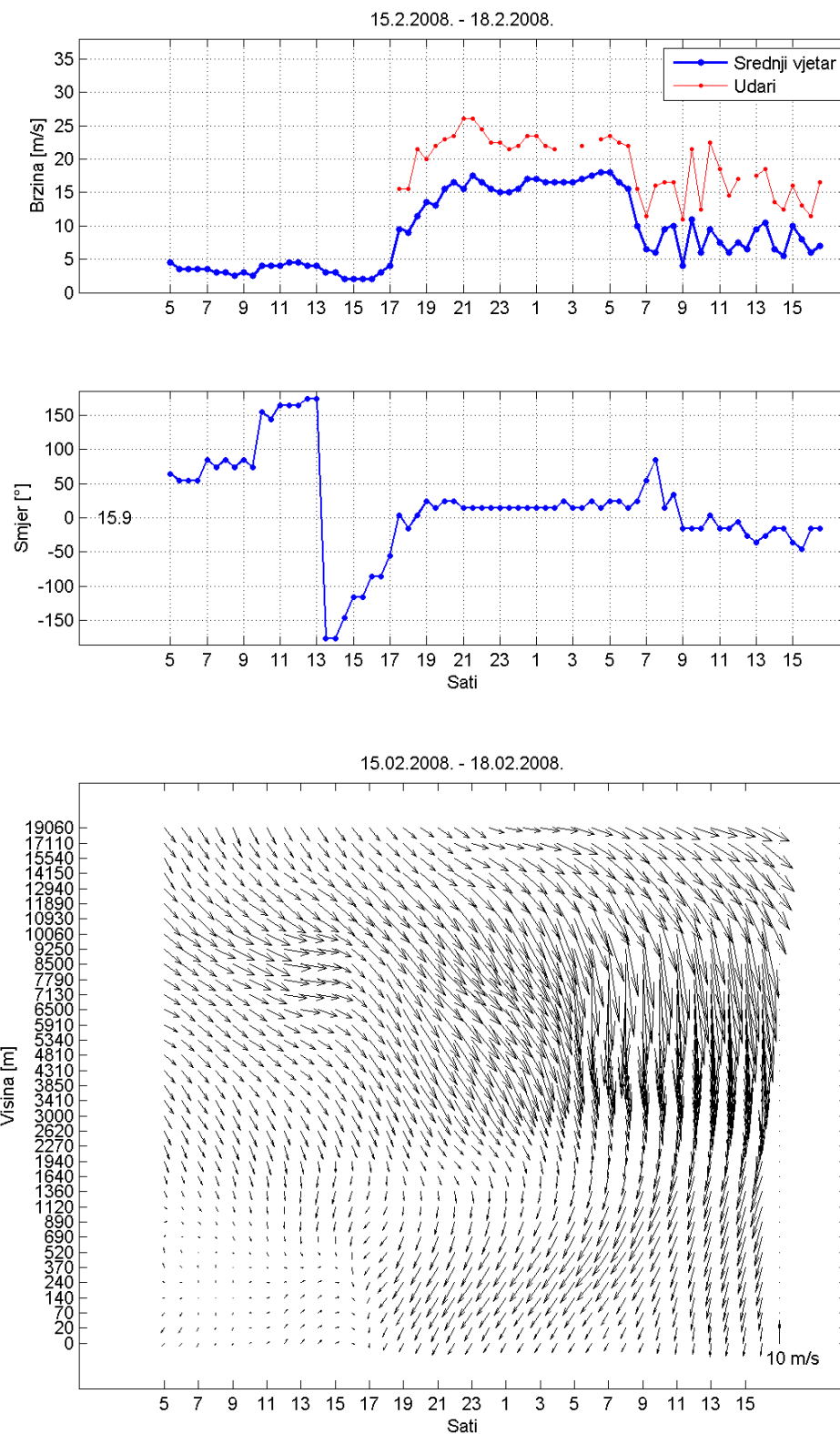
|                                                |          |
|------------------------------------------------|----------|
| Minimalna brzina puhanja [ $\text{m s}^{-1}$ ] | 6        |
| Minimalno trajanje [h]                         | 3        |
| Smjer [ $^\circ$ ]                             | 320 - 90 |

Sve epizode bure koje je algoritam pronašao pomno su analizirane tako da su se vizualno promatrali vremenski nizovi iz METAR izvješća i pseudotempa u istom vremenskom razdoblju. Time je dobiven konačan set podataka sa svim epizodama bure (uspješnost algoritama kao i svi ostali statistički podaci izneseni su u poglavlju 5.1.).

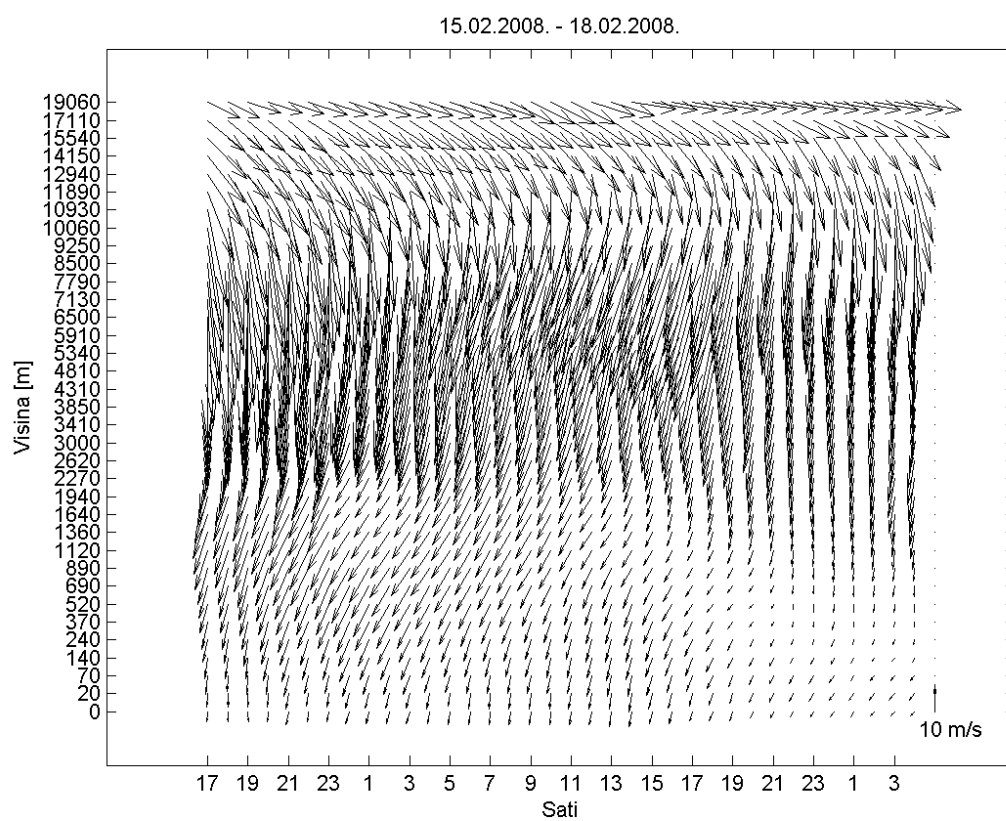
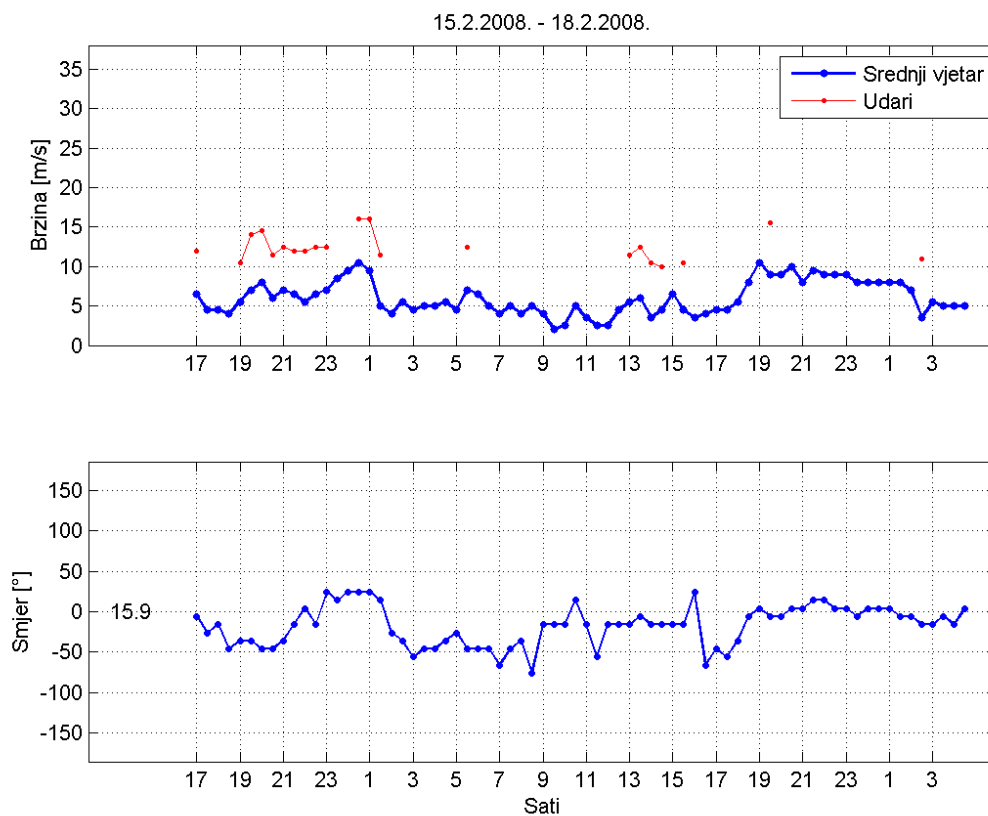
Odabrane bure je sada potrebno razdvojiti na one SM i N tipa. U tu su svrhu u prvoj iteraciji korišteni visinski podaci iz pseudotempa jer nema reprezentativnih visinskih podataka za

južni Jadran (najbliža navjetrinska radiosondažna mjerenja su ona iz Zagreba i Beograda, ali su ona nereprezentativna zbog prevelike udaljenosti). Stoga su visinski podaci iz pseudotempa ovdje jedini materijal pri procjeni dubine sloja bure. Kod slučajeva gdje se iz pseudotempa nije moglo jasno procijeniti o kojemu se tipu radi, kao pomoćni materijal korišteni su podaci iz METAR izvješća jer su prizemne karakteristike oba tipa bura poznate (Drobac, 2006). S obzirom na prethodno navedene poteškoće, u ovom se radu neće procjenjivati točna dubina sloja bure, već samo puše li ona kroz cijelu troposferu ili sloj ima negdje nižu granicu. Dubina sloja kod N-bure obično se definira visinom do koje vjetar puše iz smjera unutar nekog unaprijed određenog intervala. Za područje zračne luke Dubrovnik najpovoljniji interval je  $20^\circ \pm 60^\circ$  (Drobac, 2006). Dva tipična primjera, po jedan za svaki tip bure, prikazani su na slikama 3a i 3b. Na slici 3a vidimo početak puhanja SM-bure oko 17:30 h 15. 2. 2008. g. te njen prelazak u N-buru oko 6:30 h 16. 2. 2008. g. koja onda nastavlja puhati, Slika 3b. Za vrijeme puhanja SM-bure, sa pseudotempa se dubina sloja može odrediti (oko 1500 m), dok prelaskom na N-buru to postaje nemoguće. Ove slike lijepo pokazuju tipične karakteristike obje vrste bure navedene u poglavlju 3. Srednjak SM-bure puno je veći, dok su udari usporedivi za oba tipa bure (Slika 3a). Varijacije smjera i brzine veće su kod N-bure što se vidi na obje slike.

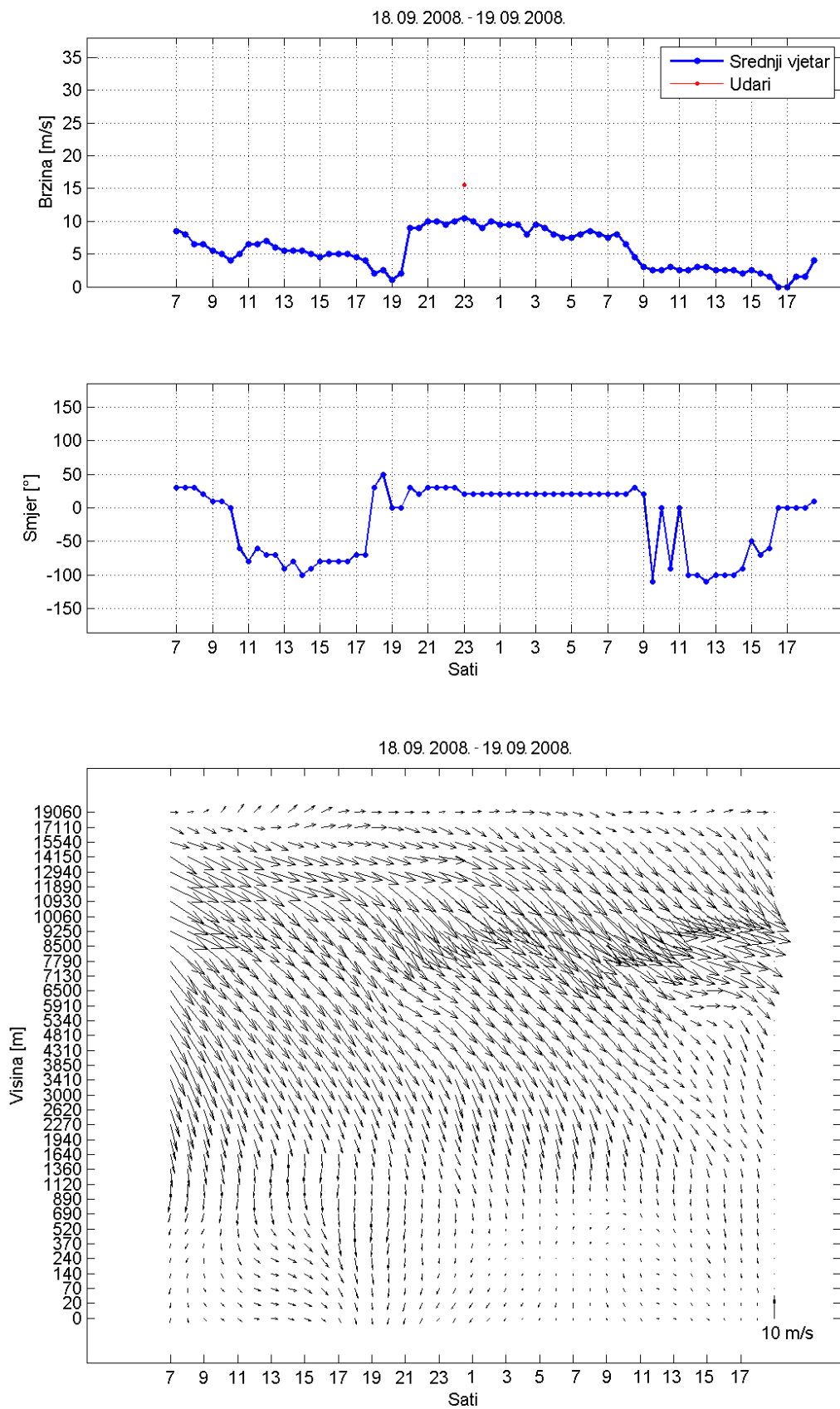
Valja napomenuti da na pragu 12 ne postoji jasna granica između SM-bure i burina, a nije provedeno ni sustavno istraživanje razlike između ta dva vjetra. Naime, za ovo područje karakterističan je netipično jak burin (Klaić i sur., 2009).  $U_{10}$  tamo često ide i preko  $10 \text{ m s}^{-1}$ , a nije neobično da se javi i pokoji udar. Na temelju osobne komunikacije s prognostičarima sa ZLD-a potvrđeno je da se oni, pri razlikovanju ova dva vjetra, uglavnom služe višegodišnjim iskustvom. Više se gleda dnevni hod smjera, nego brzina vjetra. Bura obično ojača odmah nakon zalaska Sunca, a burin par sati kasnije jer treba vremena da se u zaleđu stvori bazen hladnog zraka. Također, izlaskom Sunca, burin naglo prestaje. Poznavanje sinoptičke situacije može pomoći pri razlikovanju pojedinih tipova vjetra (u ovome radu takvi materijali nisu korišteni). Na Slici 4 dan je jedan primjer graničnog slučaja između SM-bure i burina. Srednja brzina i smjer pokazuju sve odlike burina, osim jednog netipično jakog udara. Stoga, nije jasno je li ovaj slučaj bura ili burin. Eventualno poznavanje sinoptičke situacije u to vrijeme moglo bi pomoći. Zbog mogućeg negativnog utjecaja na statistiku SM-bure, epizoda na Slici 4 kao i svi slučajevi u kojima nije bilo moguće jasno odrediti puše li bura ili burin, izuzeti su iz daljnje analize. Problem određivanja granice između ova dva vjetra ostaje neriješen i moguća je tema za neki drugi rad.



Slika 3a. Prizemni podaci iz METAR izvješća gore i pripadni pseudotemp dolje. Svaka točka na gornjoj slici prikazuje jedan desetominutni interval. Plavo su  $U_{10}$  u tom intervalu, a crveno maks. udari. Ispod toga prikazan je smjer vjetra na relativnoj skali tako da je nula srednji smjer epizode. Broj pokraj nule označava njen stvarni azimut. Datumi epizoda napisani su iznad slika tako da prvi sat na x-osi pripada prvom datumu, a posljednji sat na x-osi Slike 3b drugom. Vrijeme je u UTC-u.



Slika 3b. Nastavak iste epizode bure sa Slike 3a. Sve su oznake iste kao i na prethodnoj slici.



Slika 4. Granični slučaj između SM-bure i burina. Oznake kao i na Slici 3a, osim što je ovdje skala smjera apsolutna, tj. nula predstavlja sjeverni smjer.

## 5. Rezultati

U sljedećih nekoliko potpoglavlja bit će izneseni i diskutirani rezultati ovog istraživanja. Ocjenu rezultata započinjemo s osnovnim podacima o uspješnosti algoritma i usklađenosti prizemnih podataka s modeliranim vrijednostima u određivanju tipa bure.

### 5.1. *Uspješnost algoritma i modela*

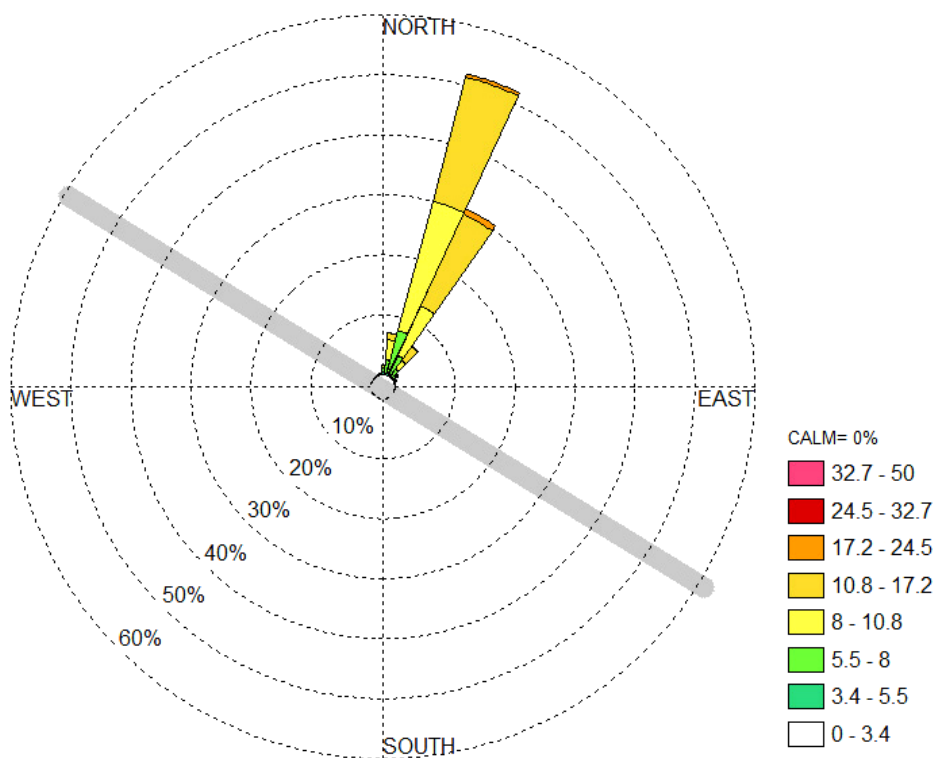
Algoritam je pronašao ukupno 280 epizoda bura. Od tog ukupnog broja, 4 slučaja su lažna i 41 slučaj je upitan. Od 41 upitnog slučaja, 38 su burini, a 3 su granična slučaja između bure i burina. Ti su slučajevi, kao što je već navedeno u poglavlju 4, izostavljeni iz analize. Dakle, ostaje 235 epizoda bura koje će biti korištene u daljnjem radu.

Ukupan broj epizoda SM-bure iznosi 209 (70 %), a N-bure 88 (30 %). Njihov zbroj nije 235 zato što u pojedinim epizodama bura mijenja karakter, tj. prelazi iz SM-tipa u N ili obratno (primjer na slikama 3a i 3b). Dobiveni omjer postotaka dobro se slaže s onima koje je dobio Drobac (2006). Od 235 epizoda dostupnih za analizu, ALADIN ne pokazuje samo njih 4 (1,5 %) što je vrlo dobar podatak u korist numeričkog modela. Kod samo 7 epizoda (3 %) se pseudotemp i METAR ne slažu oko tipa bure, tj. dok pseudotemp pokazuje npr. N-buru, ona u prizemnim podacima ima sve karakteristike SM-bure. Moguće je da je kod ovakvih situacija postojao kritični sloj u atmosferi, popraćen jakom temperaturnom inverzijom, kao u npr. Smith (1987); to bi onda objasnilo zašto je bura bila SM-tipa (Bašić, 2010). Nažalost, ovu pretpostavku nemoguće je potvrditi jer visinski podaci o vjetru i temperaturi za to područje ne postoje (kao što je već objašnjeno u poglavlju 3). Stoga je ovih par slučajeva klasificirano prema prizemnim obilježjima bure budući da su ona bila vrlo jasna.

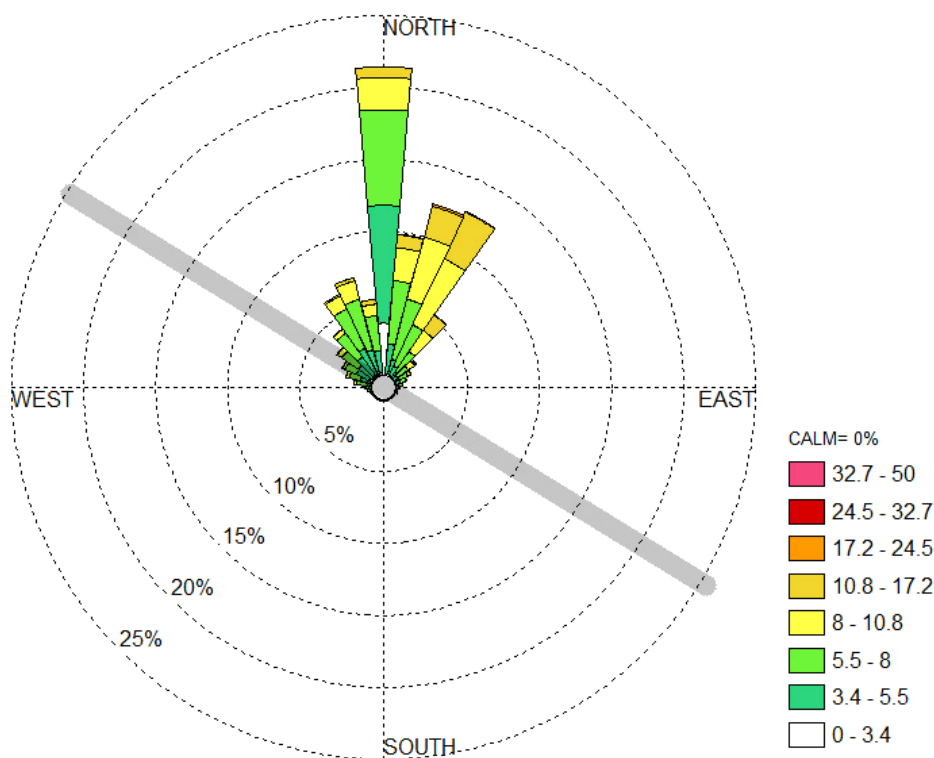
## 5.2. Klimatologija bure

Ovo potpoglavlje je posvećeno analizi rezultata vezanih uz klimatologiju bure na području zračne luke Dubrovnik. Svi podaci su iz METAR izvješća.

Slike 5 prikazuju ružu vjetrova za oba tipa bure. Na prvi se pogled odmah primjećuje kako kod N-bure (Sl. 5b) ima puno više zastupljenih smjerova, nego kod SM-bure (Sl. 5a). Najzastupljeniji smjer kod SM-bure je 20° s oko 50 %, a kod N-bure 0° s oko 20 % učestalosti. Udio brzine kod SM-bure podjednak je u svim smjerovima, ali kod N-bure to nije slučaj. Najveće se brzine postižu iz smjera sjeveroistoka što je i očekivano obzirom da se planinski lanac nalazi točno u tom smjeru.

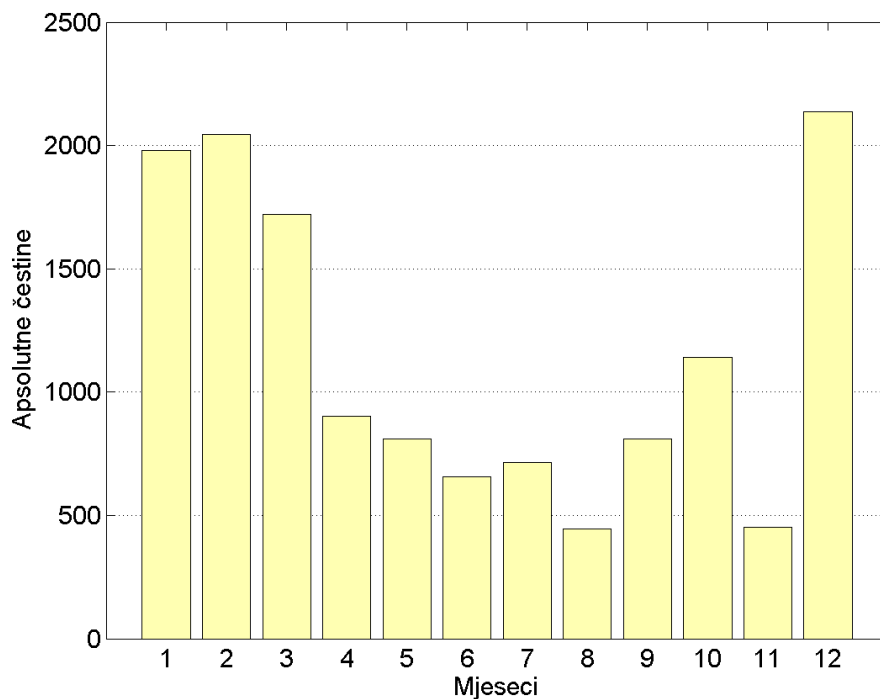


Slika 5a. Ruža smjera vjetra za SM-buru. Dolje desno prikazana je skala brzine u  $\text{m s}^{-1}$ . Crtkane kružnice označavaju učestalost pojedinog smjera izražene u postocima prikazanim na slici. Siva prozirna linija označava orijentaciju piste.

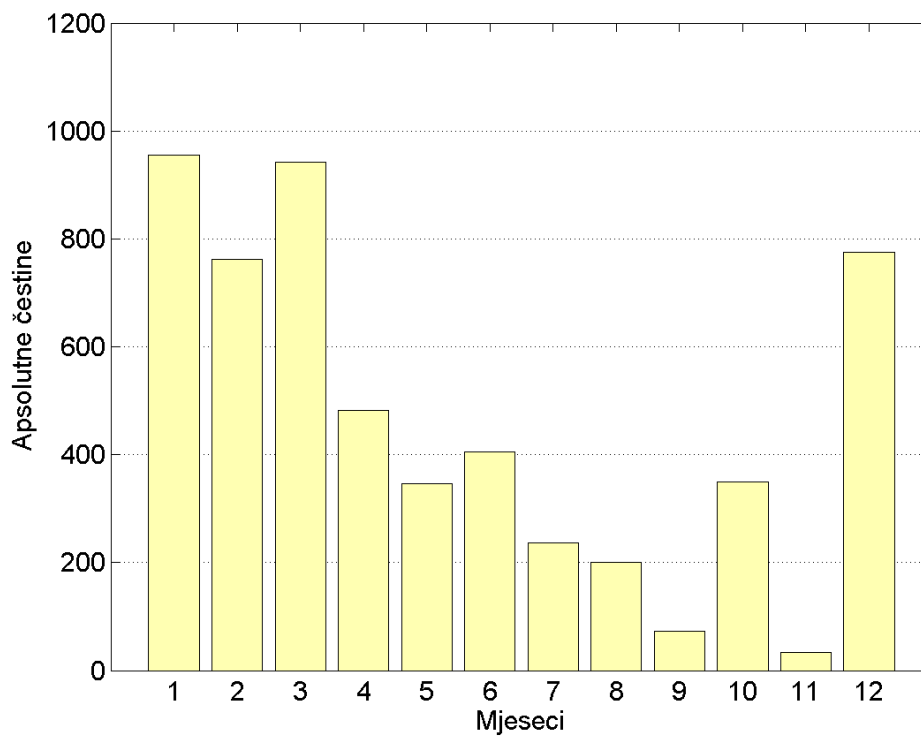


Slika 5b. Ruža smjera vjetrova za N-buru. Sve su oznake kao i na Slici 5a.

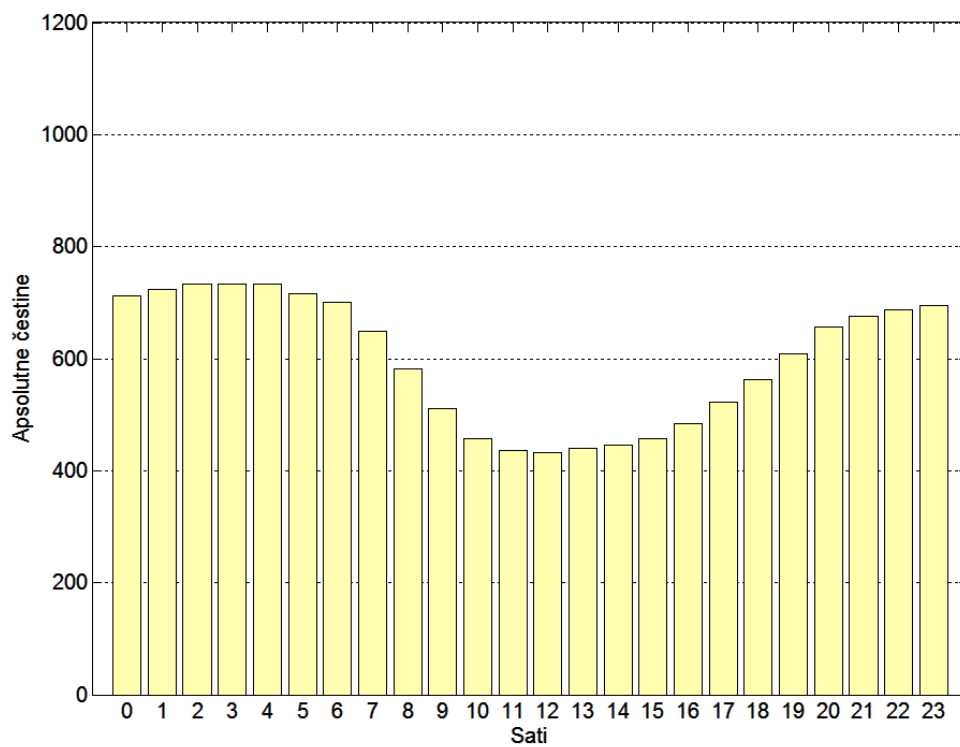
Učestalost pojave bure po mjesecima, odnosno godišnji hod pojave bure, prikazan je na Slici 6. Pogledamo li godišnji hod svih bura (Sl. 6a), vidimo da on slijedi U-razdiobu. Maksimum je u hladom dijelu godine, a minimum ljeti. Budući da znamo da je klima u Dubrovniku tipa Csa po Köppenu, tj. mediteranska (Penzar i Makjanić, 1978), i da su prodori ciklona uglavnom zimi, ovakav rezultat je očekivan. No, postoji sekundarni minimum u 11. mjesecu. Uzrok tome nadilazi okvire ovoga rada, ali od strane prognostičara sa samog aerodroma rezultat je potvrđen. Učestalost kod SM-bure ekvivalentna je onoj na Slici 6a (Slika D1 u dodatku). Kod N-bure učestalost se blago razlikuje kao što vidimo na Slici 6b, ali glavna obilježja su jednaka (U-razdioba). Na slikama 7a i 7b vidimo kako ta učestalost izgleda na dnevnoj razini. Sve bure kao i SM-bure imaju raspodjelu kakva se vidi na Slici 7a. Maksimum je tijekom noći, a minimum tijekom dana. Ta se činjenica lako može objasniti čestom pojavom „noćne“ SM-bure koje uvjetuje obalna cirkulacija (Makjanić, 1970). Noću su temperaturne razlike kopna i mora takve da pogoduju buri, osobito ljeti. More ostaje relativno toplo, dok se kopno jako ohladi što stvara gradijent tlaka od planine k moru. Noću se burin superponira s burom, dok se danju bura i maestral mogu uvelike dokidati. Kod N-bure nema izraženog preferiranja noći u odnosu na dan pa je i raspodjela uniformna.



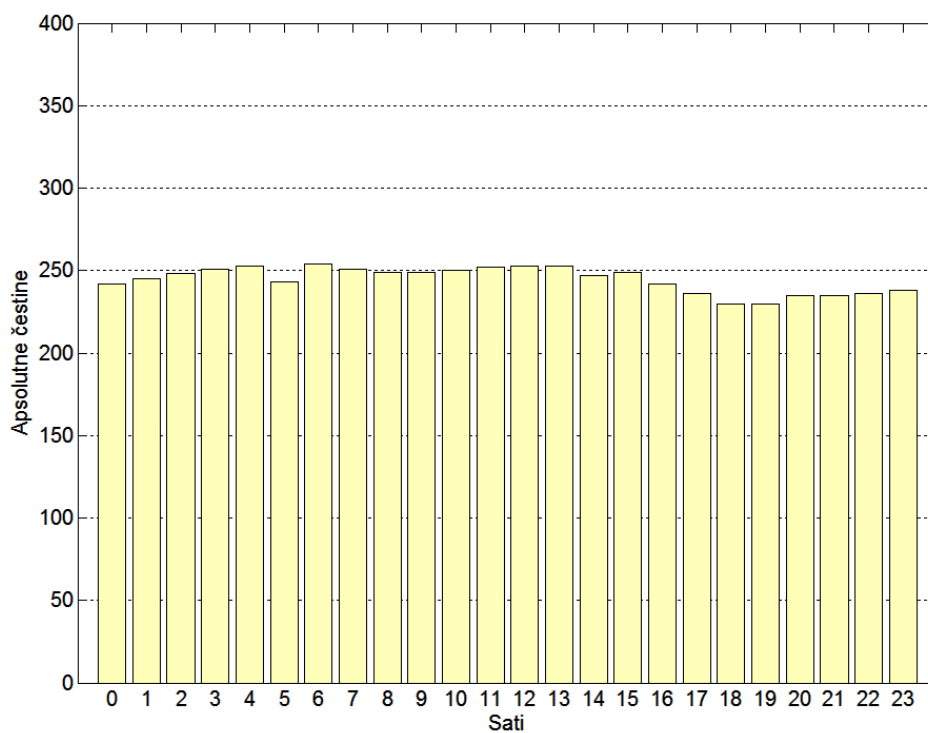
Slika 6a. Učestalost svih bura po mjesecima. Svaki pojedini podatak u ovome histogramu jedna je vrijednost iz METAR izvješća.



Slika 6b. Učestalost N-bure po mjesecima. Sve ostalo isto kao u 6a.



Slika 7a. Dnevna razdioba svih bura. Sve ostalo kao u 6a i 6b.



Slika 7b. Dnevna razdioba N-bure. Sve ostalo kao u prethodnim histogramima.

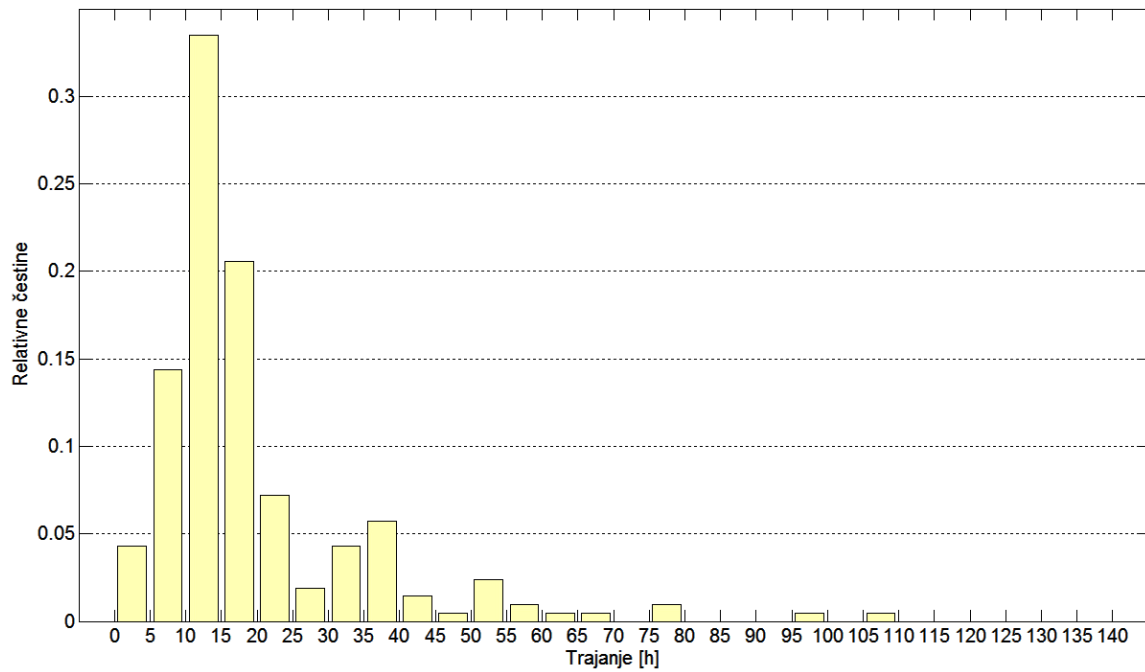
Preostalo je još reći i nešto o trajanju bure na ZLD-u. Tablica 2 prikazuje osnovna statistička obilježja histograma sa Slika 8a i b koje pokazuju trajanje oba tipa bure. Čestine su ovdje relativne, a obje osi identične kako bismo mogli lakše usporediti dvije slike. IQR u tablici 2 kratica je za interkvartilni raspon, a definiran je kao razlika trećeg i prvog kvartila. Vrijednosti u toj tablici kao i same slike govore da je N-bura općenito dugotrajnija. No, to je u suprotnosti onome što je Drobac (2006) našao u svojem radu. Odgovor zašto je to tako sastoji se od dva dijela. Prvo, u razdoblju koje je promatrao Drobac bila su samo dva slučaja N-bure, a da je ona pritom puhala tijekom cijelog trajanja epizode. Stoga, njegov uzorak ima statistički slabu značajnost. Drugo, Drobac je analizirao samo jaku buru i to u hladnom dijelu godine. Međutim, postoji velika razlika u trajanju SM-bure u hladnom i toplom dijelu godine. Da bismo to pokazali priložena je i tablica 3 te Slike 9a i b. Na tim se slikama jasno vidi razlika između hladnog dijela godine (listopad - ožujak) i toplog dijela (travanj - rujn) što potvrđuje i tablica 4. Bure su općenito dugotrajnije zimi. Uzrok tome leži, naravno, u samoj atmosferi, tj. promjenama njene cirkulacije tijekom godine. Polarna fronta zimi se spušta južnije pa su i ciklone puno češće i dugotrajnije (Penzar i Makjanić, 1978). Nadalje, zimi je kopno u prosjeku hladnije od mora što pojačava mezoskalni gradijent tlaka preko planine, a time i buru (Enger i Grisogono, 1998). Osim toga, kod SM-bura postoji već spomenuta tendencija da ljeti puše preko noći što uvelike utječe na konačnu statistiku. Spomenut ćemo još da je provjerena ovisnost srednje brzine epizoda bure o trajanju bure te da ista nije uočena (Slike D2a i D2b u dodatku).

Tablica 2. Statistika trajanja bure.

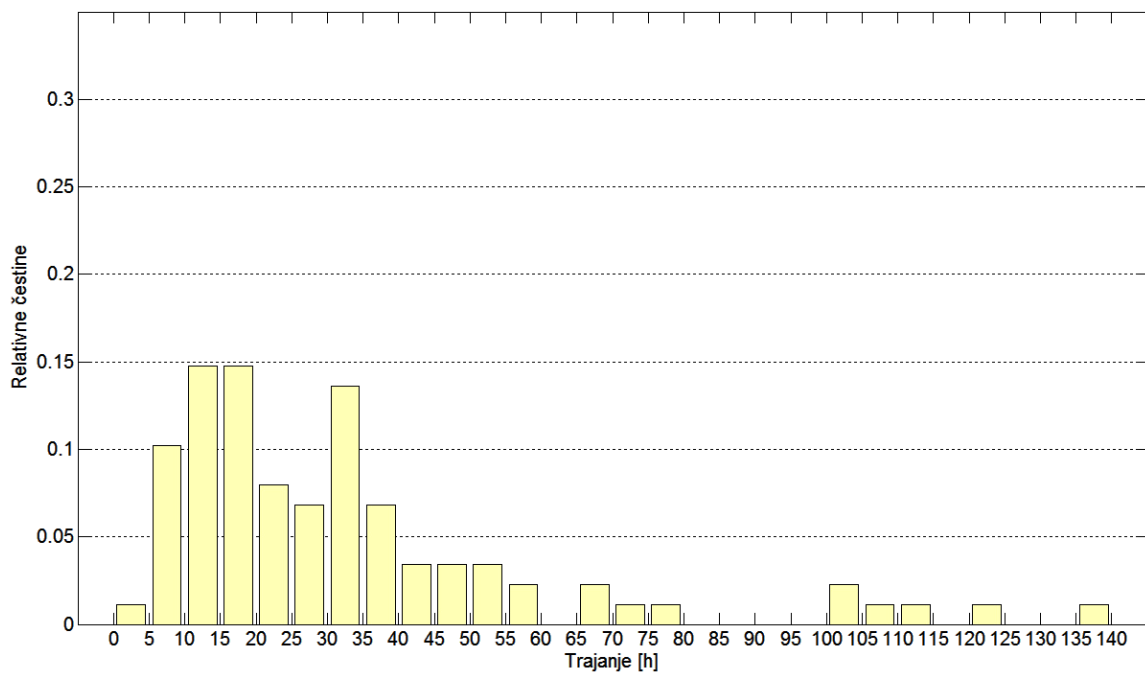
|                           | SM-bura | N-bura |
|---------------------------|---------|--------|
| Srednja vrijednost [h]    | 19,99   | 33,36  |
| Standardna devijacija [h] | 15,75   | 27,58  |
| Medijan [h]               | 15,00   | 26,50  |
| IQR [h]                   | 10,50   | 24,25  |

Tablica 3. Statistika trajanja SM-bure po razdobljima u godini.

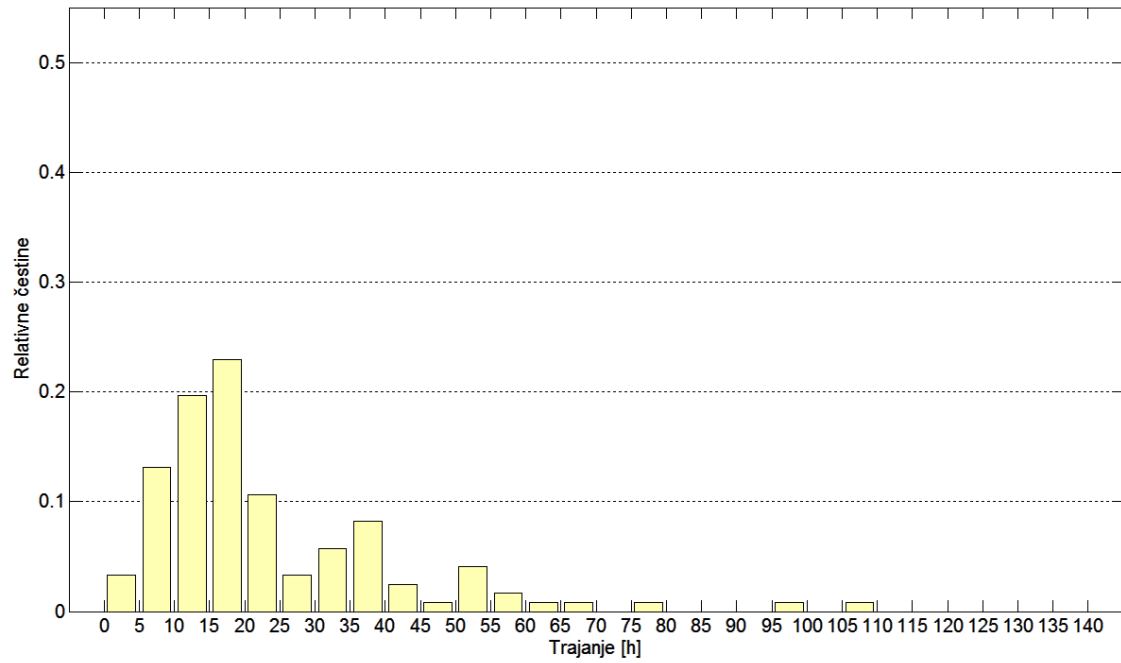
|                           | Hladni dio godine | Topli dio godine |
|---------------------------|-------------------|------------------|
| Srednja vrijednost [h]    | 23,91             | 14,49            |
| Standardna devijacija [h] | 18,04             | 9,47             |
| Medijan [h]               | 17,25             | 13,00            |
| IQR [h]                   | 21,00             | 4,75             |



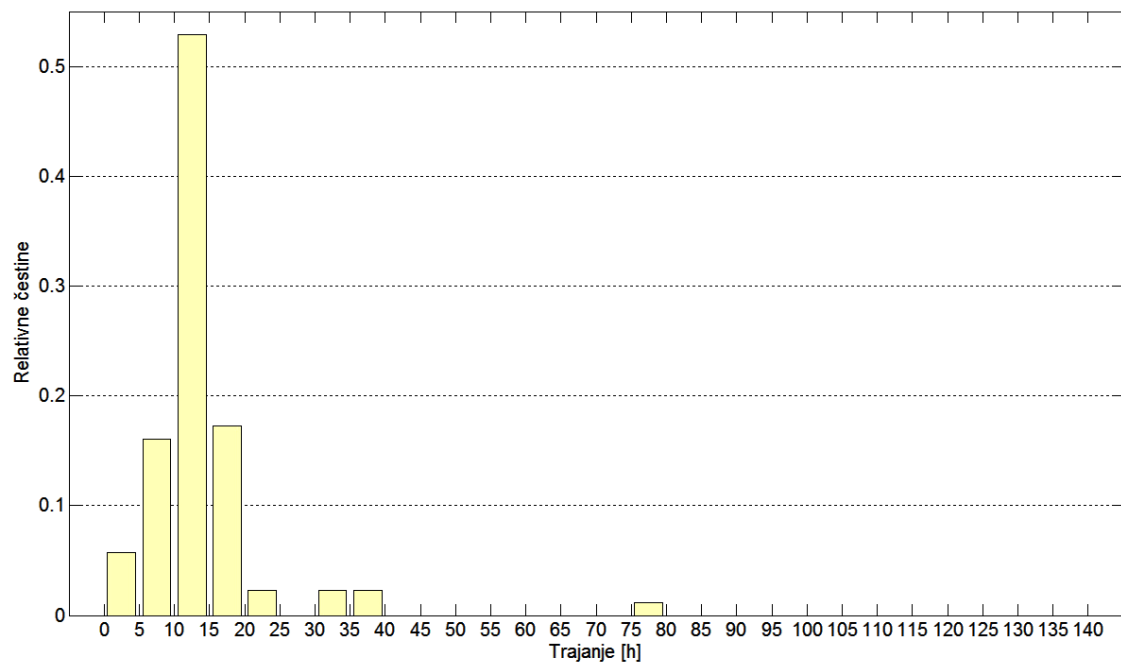
Slika 8a. Trajanje SM-bure. Na x-osi prikazano je trajanje pojedinih epizoda tako da su u prvom razredu sve bure koje traju od 1 do 5 h, u drugom od 6 do 10 itd.



Slika 8b. Trajanje N-bure. Značenje osi kao na Slici 8a.



Slika 9a. Trajanje SM-bure u hladnom dijelu godine. Osi kao i kod Slika 8a i 8b.



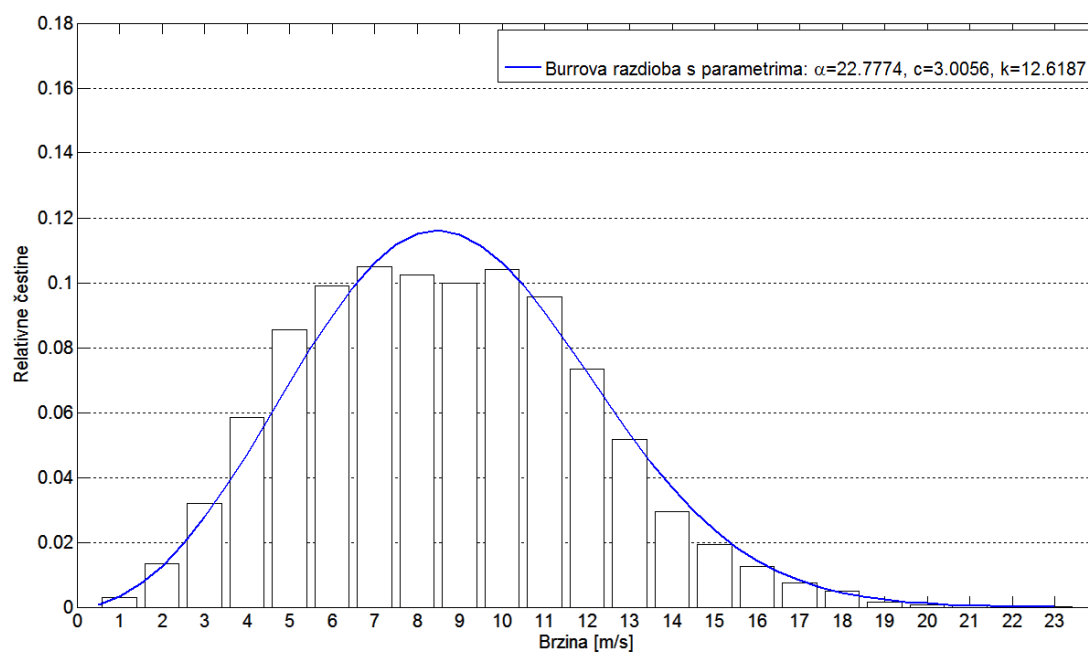
Slika 9b. Trajanje SM-bure u toplom dijelu godine. Osi kao i kod Slika 8a i 8b.

### 5.3. Usporedba SM-bure i N-bure

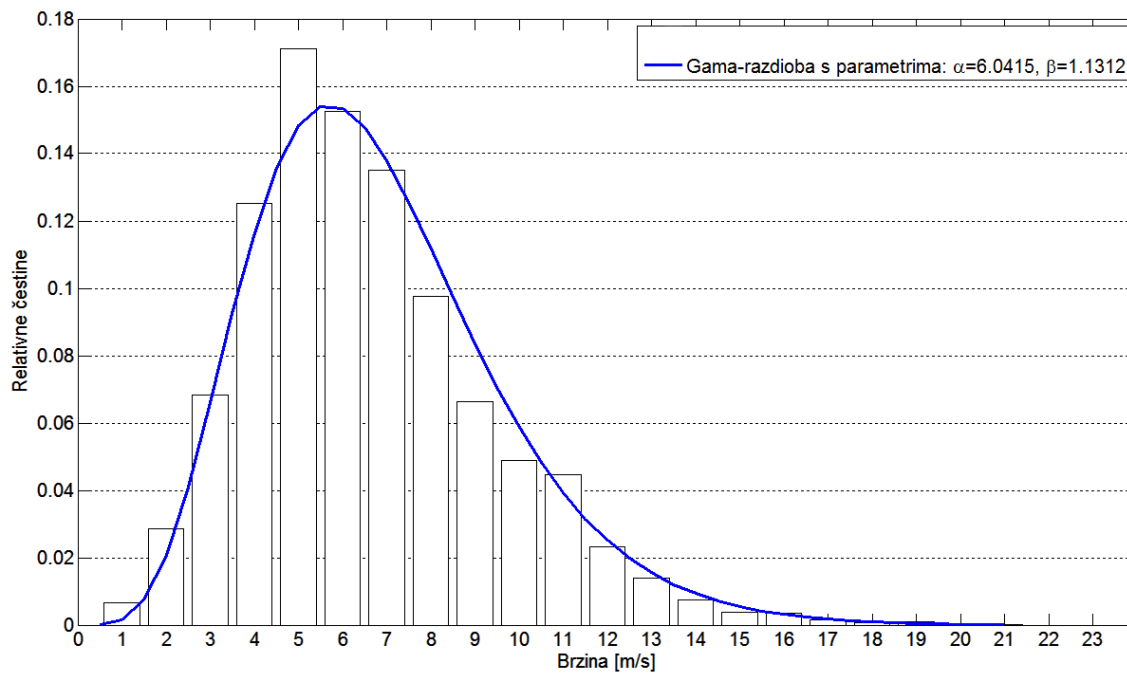
Ovdje će biti iznesene razlike između SM i N tipa bure po njihovim brzinama, smjerovima i udarima koristeći 10-min. podatke iz METAR-izvješća.

Kako je već spomenuto u uvodu, glavna asocijacija na riječ bura jest velika brzina. Stoga ćemo analizu započeti upravo brzinama. Na Slikama 10a, b i c prikazani su histogrami  $U_{10}$  iz cijelog razdoblja za sve bure te SM-buru i N-buru posebno. Obje osi jednake su na sve tri slike radi lakše međusobne usporedbe. Broj podataka korištenih za dobivanje histograma iznosi: 14218 (sve bure), 8351 (SM-bura) i 5867 (N-bura) iz čega se vidi da je uzorak značajno velik. Također, na slikama su prikazane i pripadne teorijske raspodjele koje su najbolje odgovarale promatranom setu podataka. Tablica 4 sadrži pripadne statističke podatke. Kako smo i očekivali, vidimo da je srednja vrijednost brzine kao i medijan veći kod SM-bure. Ukupan raspon zastupljene brzine podjednak je kod oba tipa. To sugerira da je varijacija brzine veće kod N-bure. O ovome će biti riječi nešto kasnije.

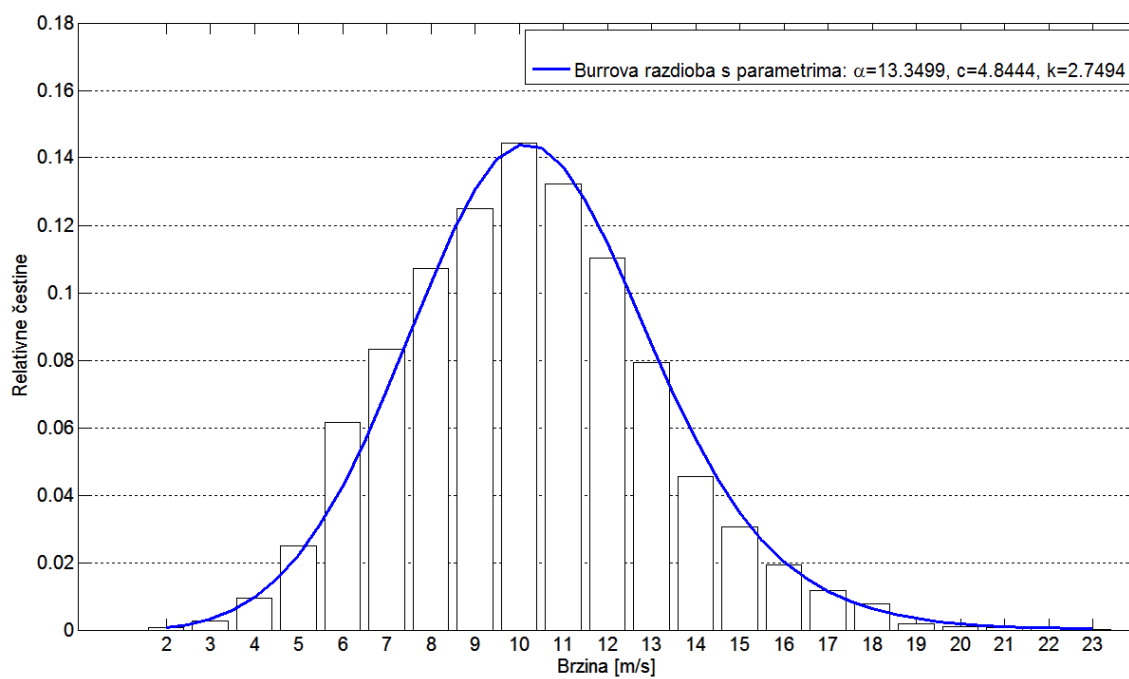
Na svaki od tri seta podataka prilagođene su i odgovarajuće razdiobe. Slike 11a, b i c pokazuju uspješnost prilagodbe. Na osi x tih slika prikazani su podaci sortirani po veličini od najmanjeg prema najvećem. Crvena linija predstavlja kumulativnu funkciju raspodjele (CDF) odabrane teorijske razdiobe čija je vjerojatnost prikazana na logaritamskoj skali osi y. Skala je logaritamska kako bi CDF bio pravac. Podacima je vrijednost na osi y pridruživana tako da je  $i$ -tom podatku na osi x pridružena vrijednost  $(i-0,5)/N$  gdje je  $N$  duljina niza. Ovime dobivamo empirijski i teorijski CDF na istoj slici i možemo vidjeti pripadaju li naši podaci odabranoj razdiobi. Sa slika se vidi kako Burrova raspodjela (Burr, 1942) odgovara podacima za sve bure kao i Gama razdioba (Jambunathan, 1954) podacima za N-buru. Druga Burrova razdioba ne odgovara, u desnom području ekstrema, danim podacima za SM-buru. Uzrok tome je predugačak rep udesno kod podataka, tj., više podataka s velikom vrijednošću brzine što se od bure i očekuje. To je ujedno i glavni razlog zašto na Slici 10c normalna razdioba ne odgovara, iako se na prvi pogled čini kako bi mogla. Burrova je razdioba, od 22 isprobane, ipak najbolje odgovarala tim podacima.



Slika 10a.  $U_{10}$  za sve bure i pripadna razdioba. Značenje parametara na slici:  $\alpha$  – parametar skale,  $c$  – prvi parametar oblika,  $k$  – drugi parametar oblika.



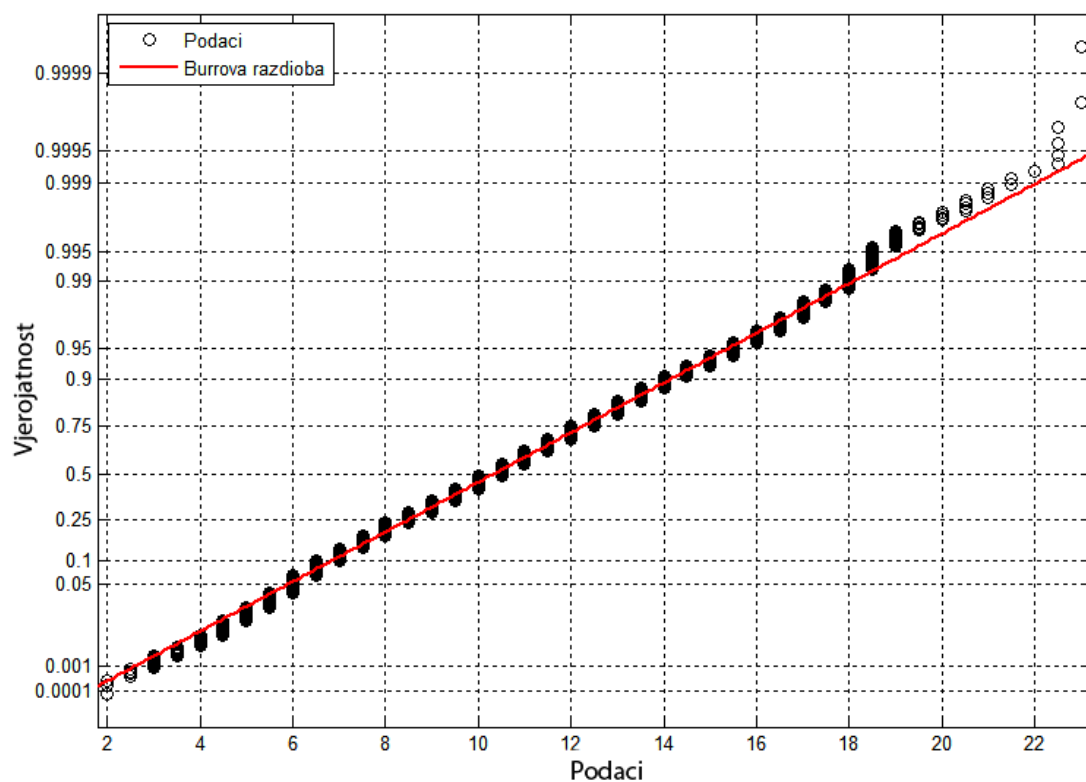
Slika 10b. Kao i 10a, ali za N-buru. Značenje parametara na slici:  $\alpha$  – parametar oblika,  $\beta$  – parametar skale.



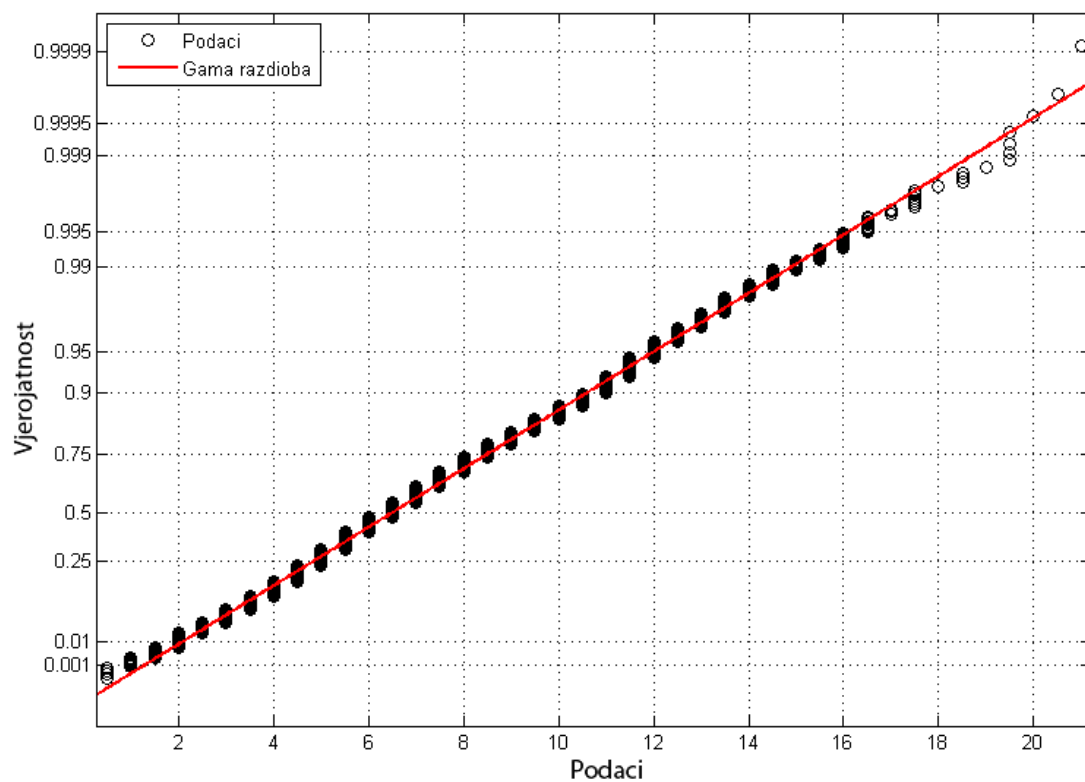
Slika 10c. Kao 10a i 10b, ali za SM-buru. Parametri kao na slici 10a.

Tablica 4. Statistički podaci nizova  $U_{10}$  SM, N i svih bure.

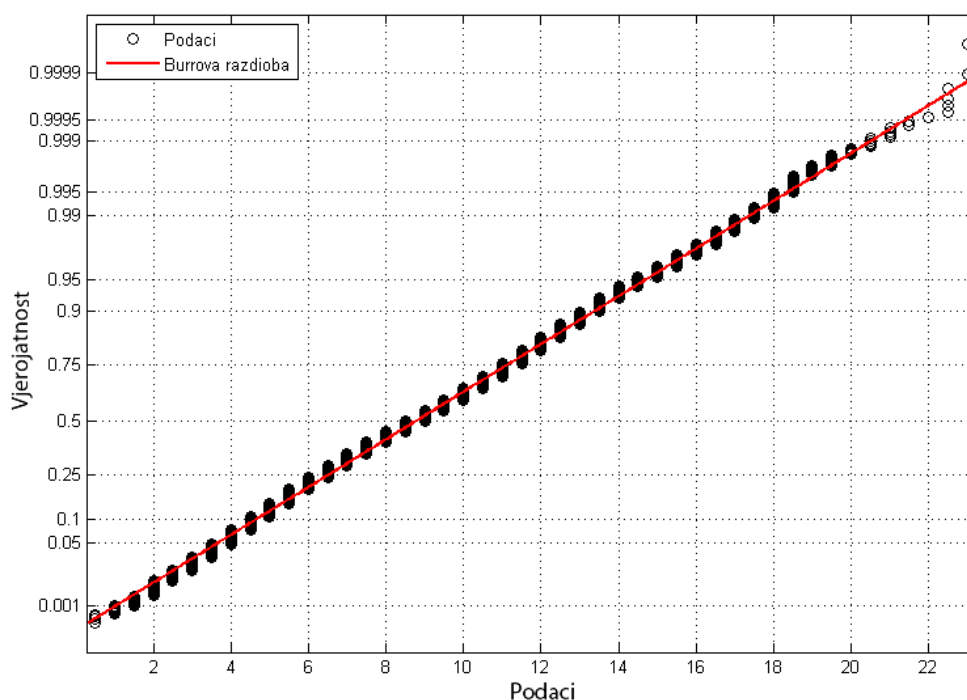
|                                             | SM-bura | N-bura | Sve bure |
|---------------------------------------------|---------|--------|----------|
| Srednja vrijednost [ $\text{m s}^{-1}$ ]    | 10,43   | 6,83   | 8,90     |
| Standardna devijacija [ $\text{m s}^{-1}$ ] | 2,89    | 2,78   | 3,37     |
| Medijan [ $\text{m s}^{-1}$ ]               | 10,50   | 6,50   | 9,00     |
| IQR [ $\text{m s}^{-1}$ ]                   | 3,50    | 3,50   | 4,50     |



Slika 11a. Empirijski i teorijski CDF. Na x-osi nalaze se brzina za SM-buru sortirana od najmanje do najveće. Crvena linija je CDF odabrane teorijske raspodjele čija je vjerojatnost prikazana na logaritamskoj skali osi y. Crni kružići su podaci brzine SM-bure.



Slika 11b. Kao i slika 11a, ali za N-buru.

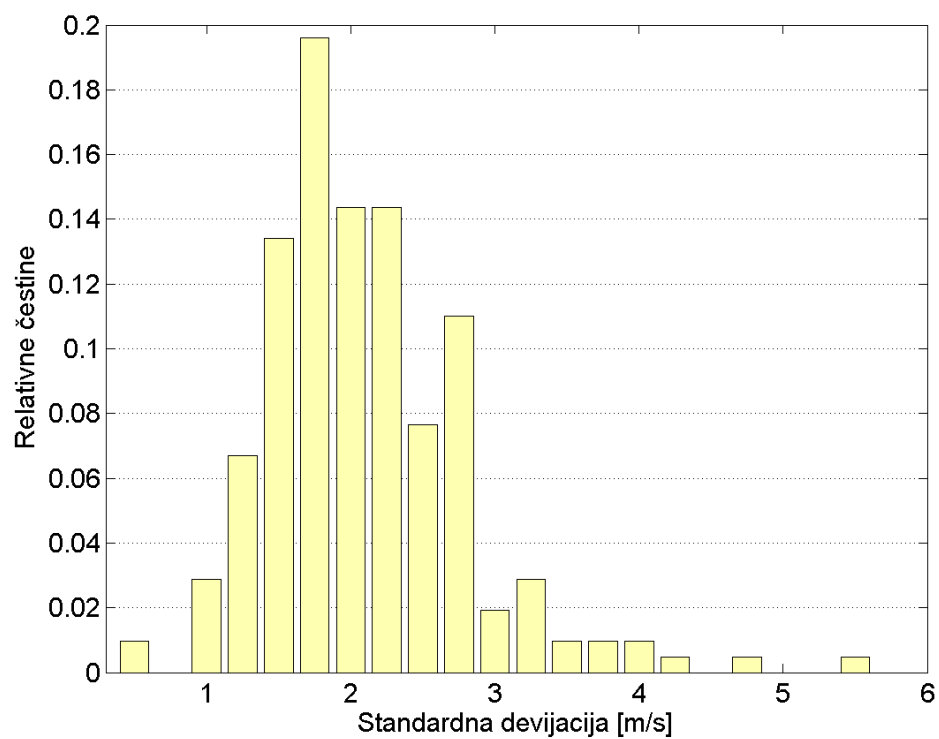


Slika 11c. Kao i slike 11a i 11b, ali za sve bure.

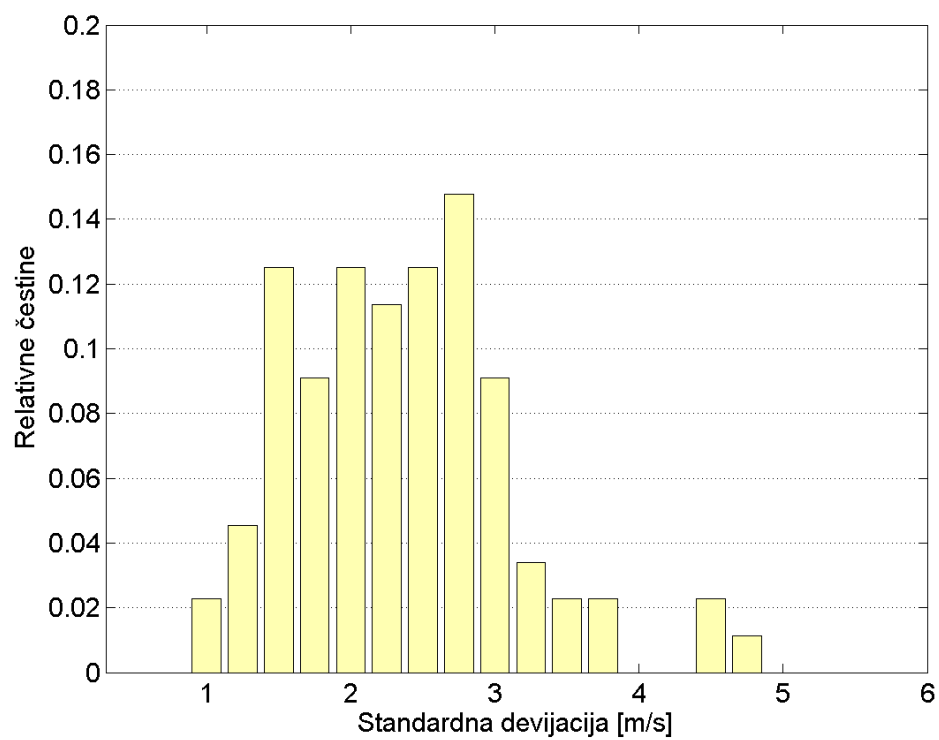
Sada se nameće pitanje kako se brzina  $U_{10}$  ponaša kroz pojedinu epizodu bure, varira li podjednako ili ne? U tu svrhu tablica 5 prikazuje statističke informacije o procjenitelju standardne devijacije  $U_{10}$  za oba promatrana tipa bure prikazane na Slikama 12a i b.  $U_{10}$  kod N-bure više se mijenja kroz epizodu – standardna devijacija im je veća, ali razlike nisu velike. No, ovdje moramo uzeti u obzir da je srednja vrijednost same brzine veća kod SM-bure. Zapisano u standardnom obliku kao srednjak brzine svih epizoda  $\pm$  srednja standardna devijacija brzine kroz epizodu, za SM-buru imamo:  $(10,43 \pm 2,09) \text{ m s}^{-1}$ , a za N-buru:  $(6,83 \pm 2,35) \text{ m s}^{-1}$ . Omjer standardne devijacije i srednjaka nam daje koeficijent varijacije (CV) i on u prvom slučaju iznosi 20 %, a u drugom 34 %. Iz ovoga se jasnije vidi kako je varijabilnost  $U_{10}$  značajnije veća kod N-bure.

Tablica 5. Statistika procjenitelja standardne devijacije  $U_{10}$  oba tipa bure.

|                                             | SM-bura | N-bura |
|---------------------------------------------|---------|--------|
| Srednja vrijednost [ $\text{m s}^{-1}$ ]    | 2,09    | 2,35   |
| Standardna devijacija [ $\text{m s}^{-1}$ ] | 0,69    | 0,76   |
| Medijan [ $\text{m s}^{-1}$ ]               | 1,98    | 2,31   |
| IQR [ $\text{m s}^{-1}$ ]                   | 0,80    | 0,97   |



Slika 12a. Standardna devijacija  $U_{10}$  svake pojedine epizode SM-bure.

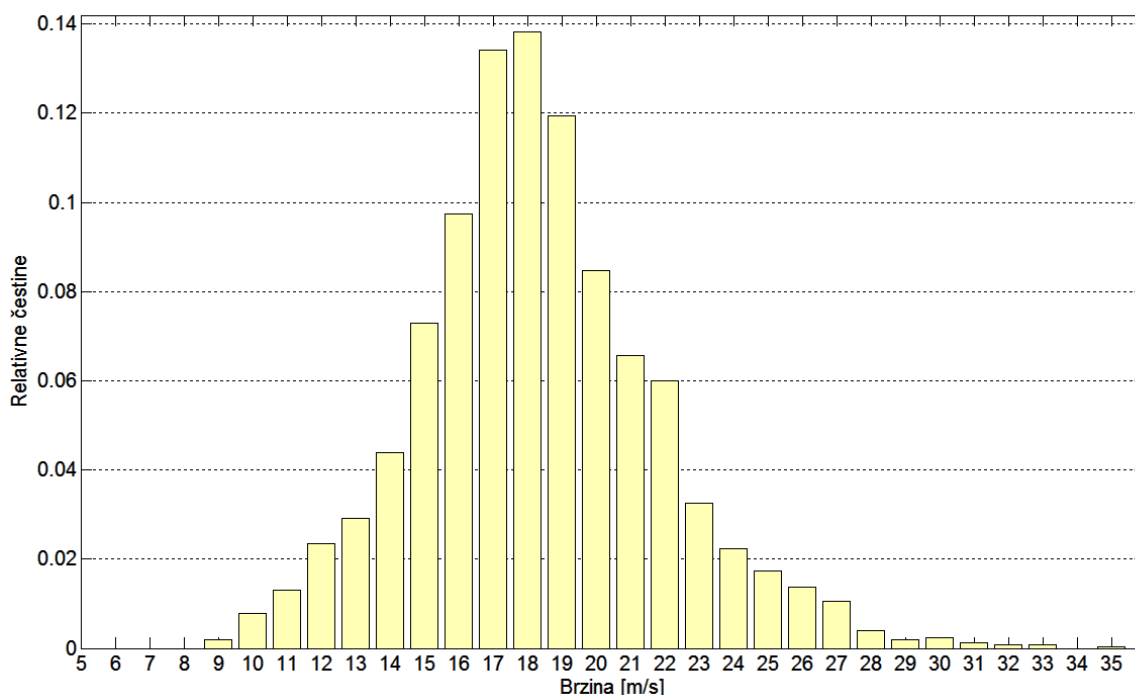


Slika 12b. Kao i 12a, ali za N-buru.

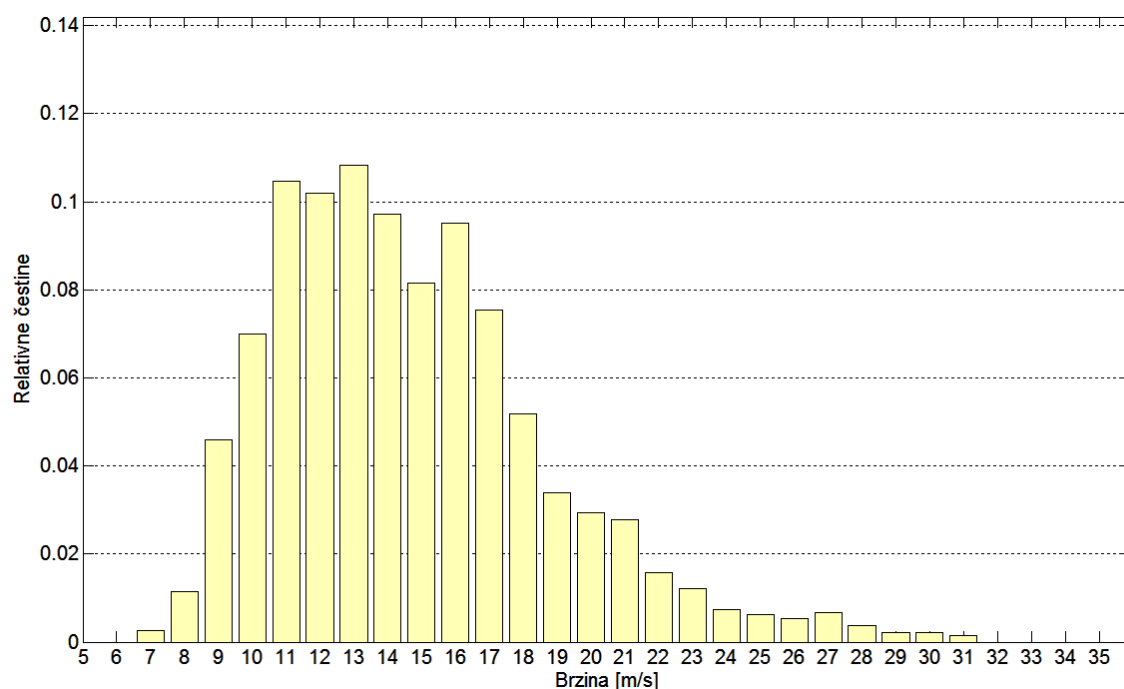
Jedno od glavnih obilježja bure svakako su udari. Drobac (2006) u svome radu navodi da su udari kod N-bure usporedivi s onima kod SM-bure iako je srednja brzina tih bura manja. Nadalje, Drobac kaže kako upravo to svojstvo čini N-buru opasnom. Tablica 6 sadrži osnovne statističke podatke histograma svih zabilježenih udara za oba tipa bure prikazanih na Slikama 13a i b. Kod SM-bure takvih podataka je 2547 (30,5 % ukupnog broja termina s SM-burom), a kod N-bure 1912 (32,5 % ukupnog broja termina s N-burom). Iz tablice 7 vidimo da su srednji udari veći kod SM-bure, a sa Slika 13 da je ukupan raspon podjednak. Očito je da udari kod SM-bure imaju svojstvo duljeg zadržavanja većih brzina.

Tablica 6. Statistika nizova udara za oba tipa bure.

|                                             | SM-bura | N-bura |
|---------------------------------------------|---------|--------|
| Srednja vrijednost [ $\text{m s}^{-1}$ ]    | 18,50   | 14,95  |
| Standardna devijacija [ $\text{m s}^{-1}$ ] | 3,53    | 4,06   |
| Medijan [ $\text{m s}^{-1}$ ]               | 18,55   | 14,50  |
| IQR [ $\text{m s}^{-1}$ ]                   | 4,00    | 5,00   |



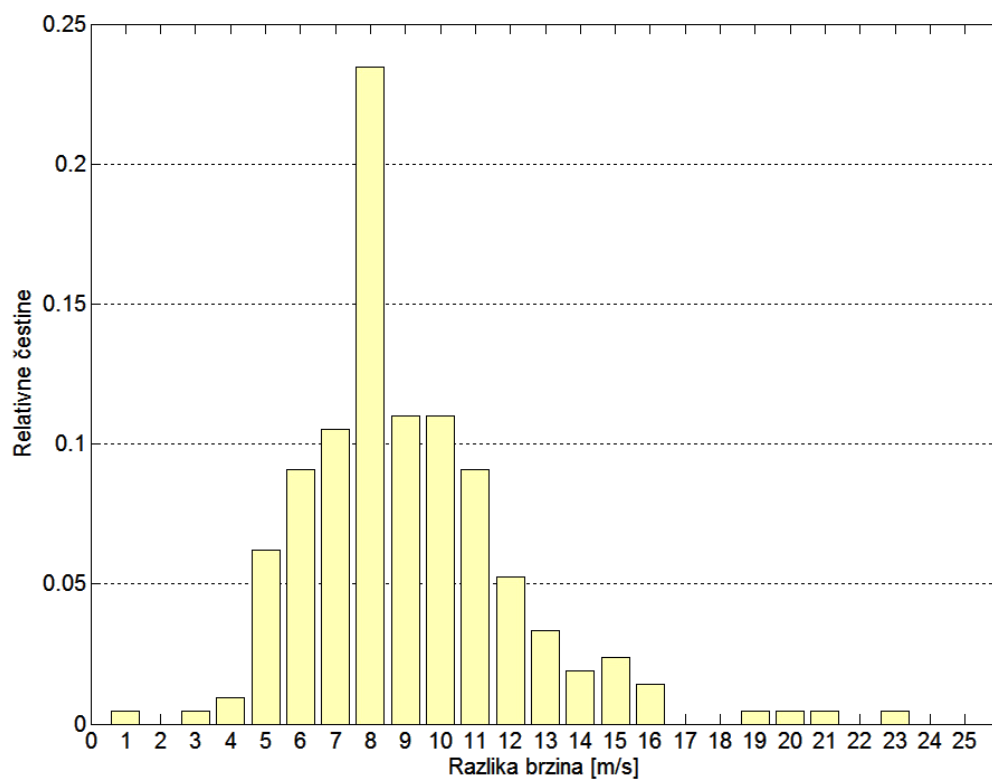
Slika 13a. Udari SM-bure.



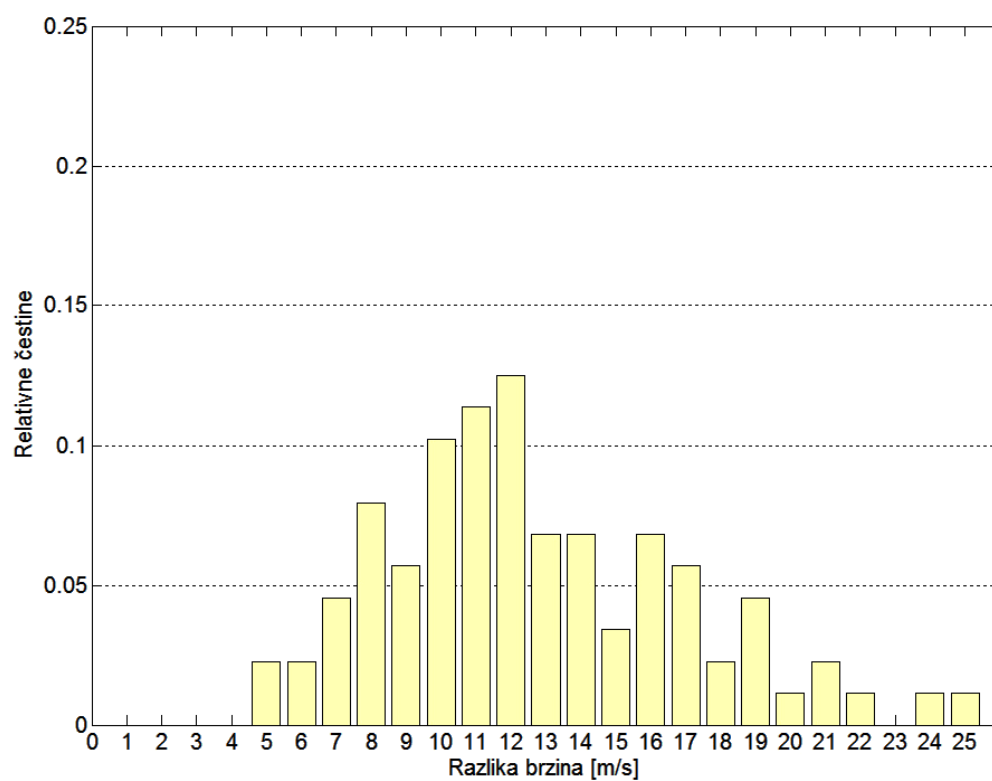
Slika 13b. Udari N-bure.

Da bismo mogli nešto više zaključiti o ponašanju oba tipa bure, moramo znati kako se odnose udari i srednja brzina vjetra. Najjednostavnije što možemo napraviti jest izračunati srednjak udara pojedine epizode i srednju brzinu te epizode, oduzeti drugu vrijednost od prve, a dobivena bi razlika trebala biti veća kod N-bure. Upravo se to i dobiva. Za SM-buru ona iznosi  $6,60 \text{ m s}^{-1}$ , a za N-buru  $7,31 \text{ m s}^{-1}$ . Razlika između te dvije vrijednosti nije velika, iznosi samo  $0,71 \text{ m s}^{-1}$ . Trebamo neku drugu procjenu jer ova mala razlika malo govori o razlici između SM i N-bure.

Razlike će jače doći do izražaja pogledamo li odnos maksimalnih udara sa srednjom brzinom epizode. Na Slikama 14a i b prikazan je odnos maksimalnih udara i srednje brzine pojedine epizode, a u tablici 7 pripadajuća statistika. Različitost je sada puno uočljivija. Kod N-bure, razlika između maksimalnih udara i srednje brzine epizode veća je nego kod SM-bure. Iz ovoga slijedi i veća opasnost za zrakoplove kod puhanja N-bure. U jednom vremenskom intervalu njeni udari mogu biti relativno bezopasni da bi onda naglo ojačali do olujnih jakosti.



Slika 14a. Razlika maksimalnog udara i srednje brzine epizode za SM-buru.

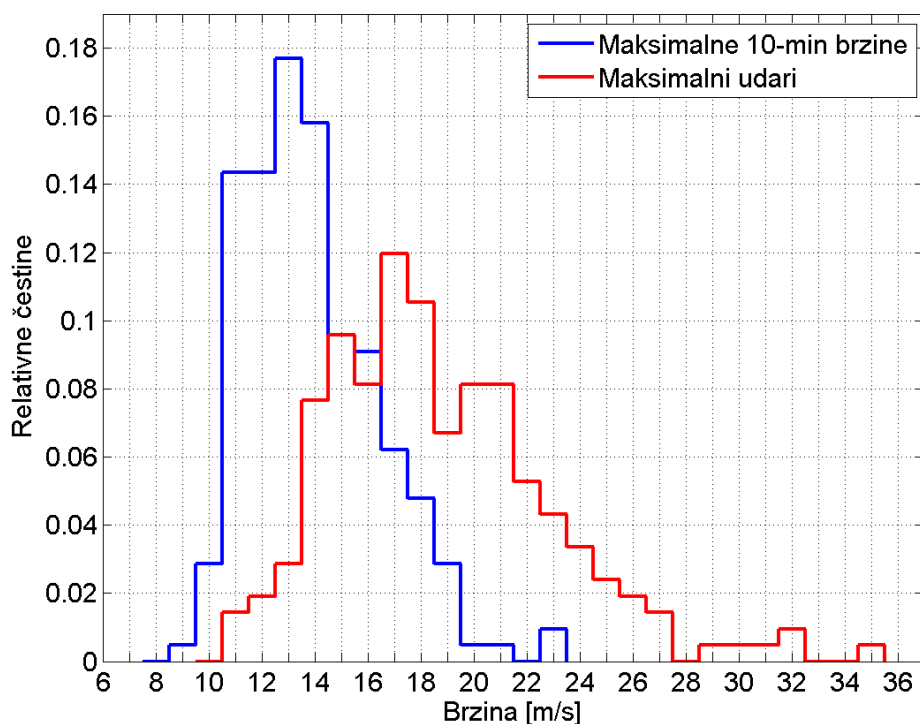


Slika 14b. Kao i 14a, ali za N-buru.

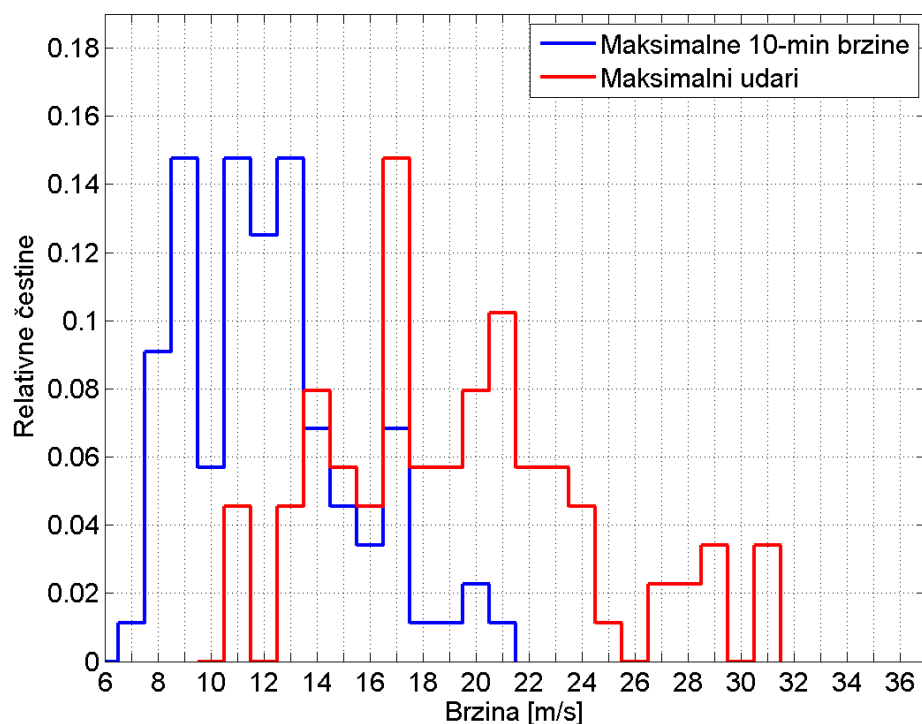
Tablica 7. Razlika maksimalnih udara i srednjih brzina epizoda za oba tipa bure.

|                                             | SM-bura | N-bura |
|---------------------------------------------|---------|--------|
| Srednja vrijednost [ $\text{m s}^{-1}$ ]    | 9,11    | 12,63  |
| Standardna devijacija [ $\text{m s}^{-1}$ ] | 3,01    | 4,30   |
| Medijan [ $\text{m s}^{-1}$ ]               | 8,43    | 11,73  |
| IQR [ $\text{m s}^{-1}$ ]                   | 3,28    | 5,99   |

Budući da su u zrakoplovstvu bitne maksimalne vrijednosti i udara i srednjih brzina, napraviti ćemo još i analizu maksimalne brzine za svaku pojedinu epizodu. Slike 15a i b prikazuju histograme maksimalnih  $U_{10}$  i maksimalnih udara svih epizoda za oba tipa bure, a tablica 8 pripadnu statistiku. Ova se tablica može izravno usporediti s tablicom 5. Iako im je razlika u  $U_{10}$  velika, razlika u maksimalnim  $U_{10}$  puno je manja, a u maksimalnim udarima N-bura čak i nadmašuje SM-buru.



Slika 15a. Maksimalni  $U_{10}$  (plavo) i maksimalni udari (crveno) za SM-buru.

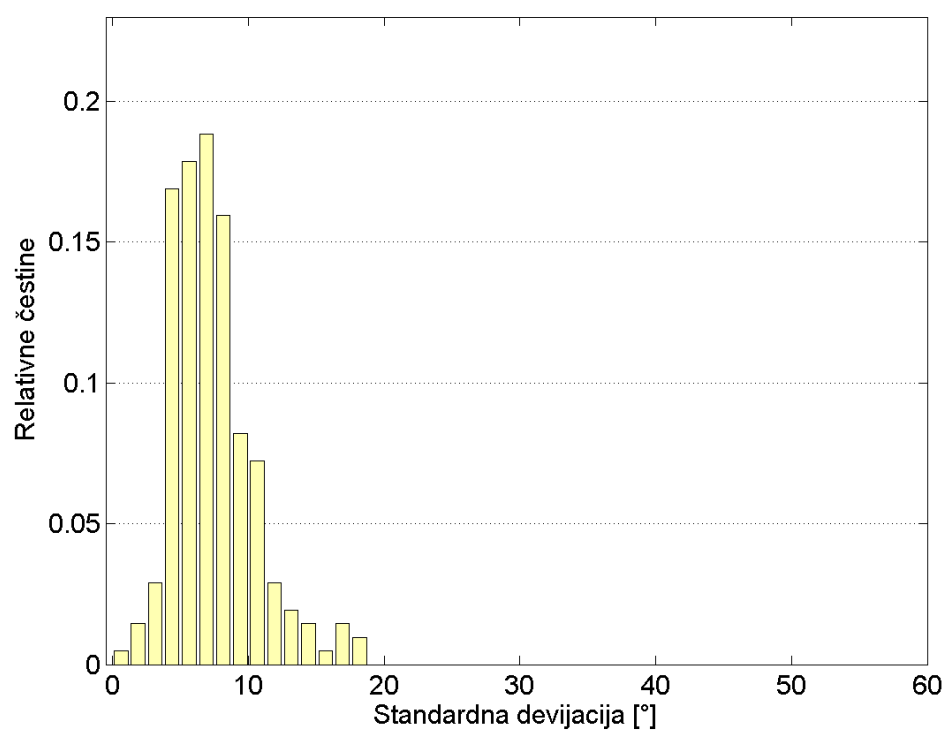


Slika 15b. Kao i 16a, ali za N-buru.

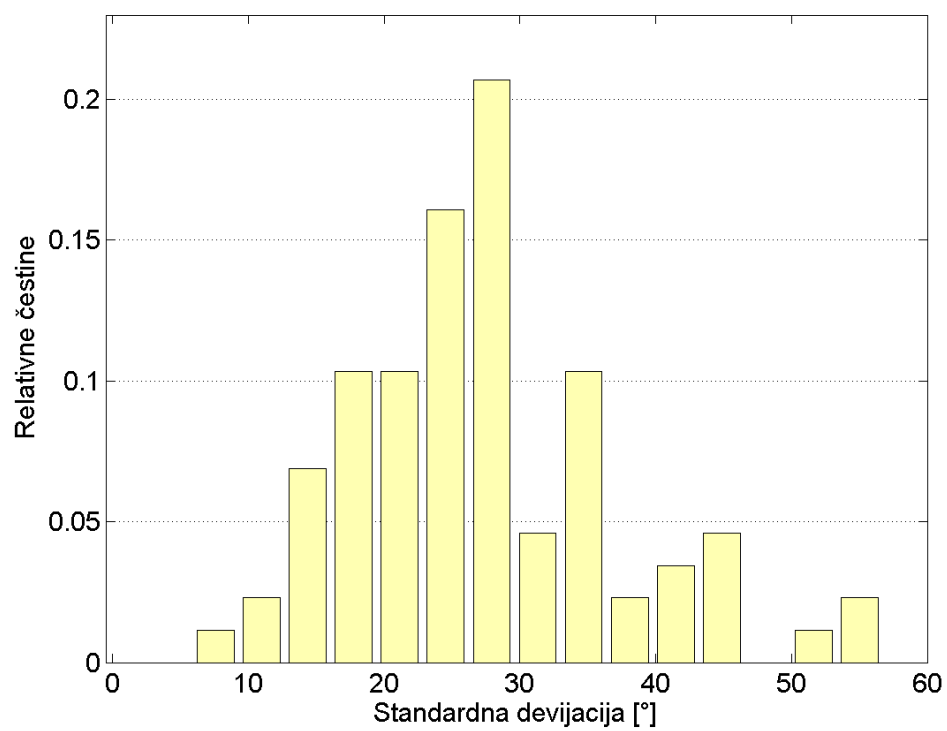
Tablica 8. Statistika maksimalnih udara i maksimalnih srednjih brzina epizoda za oba tipa bure.

|                                             | Brzina (SM) | Brzina (N) | Udari (SM) | Udari (N) |
|---------------------------------------------|-------------|------------|------------|-----------|
| Srednja vrijednost [ $\text{m s}^{-1}$ ]    | 13,67       | 12,48      | 19,42      | 19,62     |
| Standardna devijacija [ $\text{m s}^{-1}$ ] | 2,51        | 3,14       | 4,18       | 4,88      |
| Medijan [ $\text{m s}^{-1}$ ]               | 13,50       | 12,00      | 18,5       | 19        |
| IQR [ $\text{m s}^{-1}$ ]                   | 3,12        | 4,75       | 5,00       | 6,25      |

Konačno, preostalo je reći nešto i o smjerovima bure za ZLD-u. Klimatološki dio usporedbe napravljen je već u potpoglavlju 5. 2. i na slikama 5a i b. Tamo je navedeno kako je više smjerova zastupljeno kod N-bure, nego kod SM-bure. Kao što se vidi na slikama 5a i b, zastupljeni smjerovi kod SM-bure uglavnom su samo iz prvog kvadranta, dok se kod N-bure javljaju smjerovi iz cijelog prvog i drugog kvadranta, a pojavljuju se smjerovi čak i iz trećeg i četvrtog. Da bi se usporedila varijabilnost smjerova, izračunate su standardne devijacije smjera svake pojedine epizode SM-bure. Slike 16a i b prikazuju raspodjelu procjenitelja standardne devijacije smjera za oba tipa bure, a tablica 9 daje osnovne statističke informacije.



Slika 16a. Standardna devijacija smjera SM-bure.



Slika 16b. Kao i 17a, ali za N-buru.

Svaki pojedini podatak u histogramu predstavlja standardnu devijaciju jedne epizode tog tipa bure. Broj epizoda naveden je već u potpoglavlju 5. 1. Na temelju ovdje iznesenih informacija može se zaključiti kako smjer kod N-bure više varira kroz jednu epizodu i da se ukupno, u svim epizodama, pojavljuje više smjerova. Ovo potvrđuje i rezultate koje je neovisno dobio Drobac (2006).

Tablica 9. Statistika procjenitelja standardne devijacije smjera oba tipa bure.

|                           | SM-bura | N-bura |
|---------------------------|---------|--------|
| Srednja vrijednost [°]    | 7,41    | 27,26  |
| Standardna devijacija [°] | 3,07    | 9,95   |
| Medijan [°]               | 6,85    | 26,31  |
| IQR [°]                   | 3,32    | 12,00  |

Na kraju ovog poglavlja ukratko će biti iznesene dobivene informacije o karakteru oba tipa. SM-bura ima veću srednju vrijednost  $U_{10}$ , veći srednjak udara i ujednačeniji smjer. Kod N-bure prisutne su veće varijacije i smjera i brzine, a maksimalni udari usporedivi su s onima iz SM-bure. Sva navedena svojstva čine N-buru opasnijom za zračni promet te teže predvidivom. Ovime su potvrđeni i svi zaključci izneseni u Drobac (2006). Na temelju svih informacija u ovome poglavlju, u tablici 10 prikazane su tipične epizode obje bure na pragu 12 zračne luke Dubrovnik.

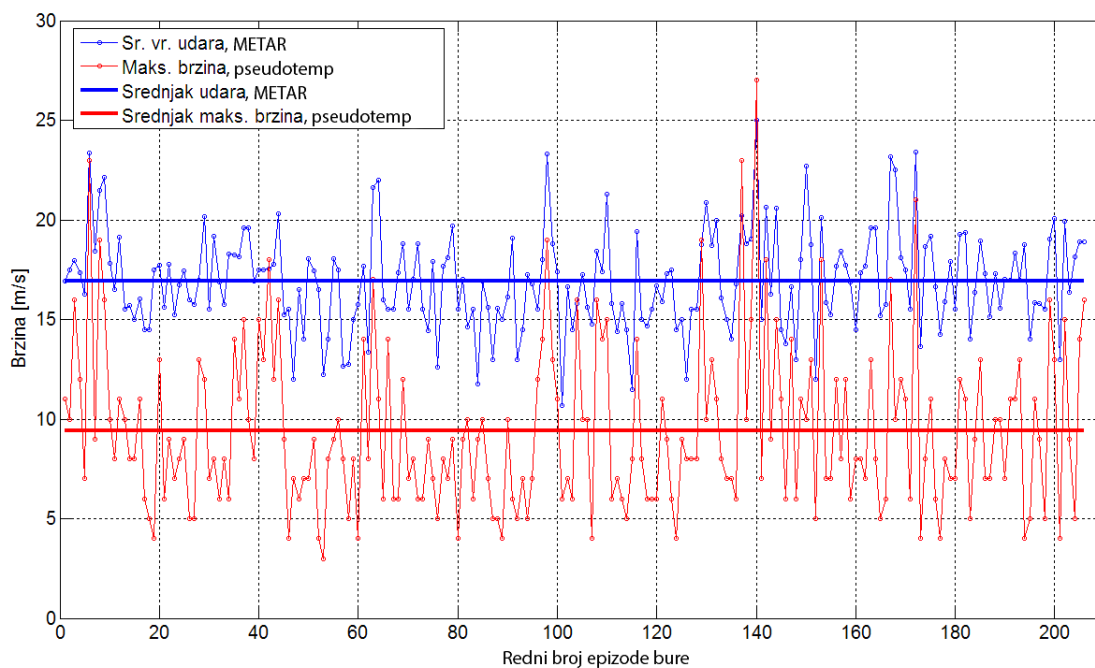
Tablica 10. Prosječne epizode oba tipa bure.

|                                                 | SM-bura | N-bura  |
|-------------------------------------------------|---------|---------|
| Srednja vrijednost brzine [ $\text{m s}^{-1}$ ] | 10,43   | 6,83    |
| Srednja vrijednost udara [ $\text{m s}^{-1}$ ]  | 18,50   | 14,95   |
| Srednji maksimalni udar [ $\text{m s}^{-1}$ ]   | 19,42   | 19,62   |
| Najzastupljeniji smjerovi ( $N=0^\circ$ ) [°]   | 15 - 30 | 355 - 5 |
| Prosječno trajanje epizode [h]                  | 20      | 33      |

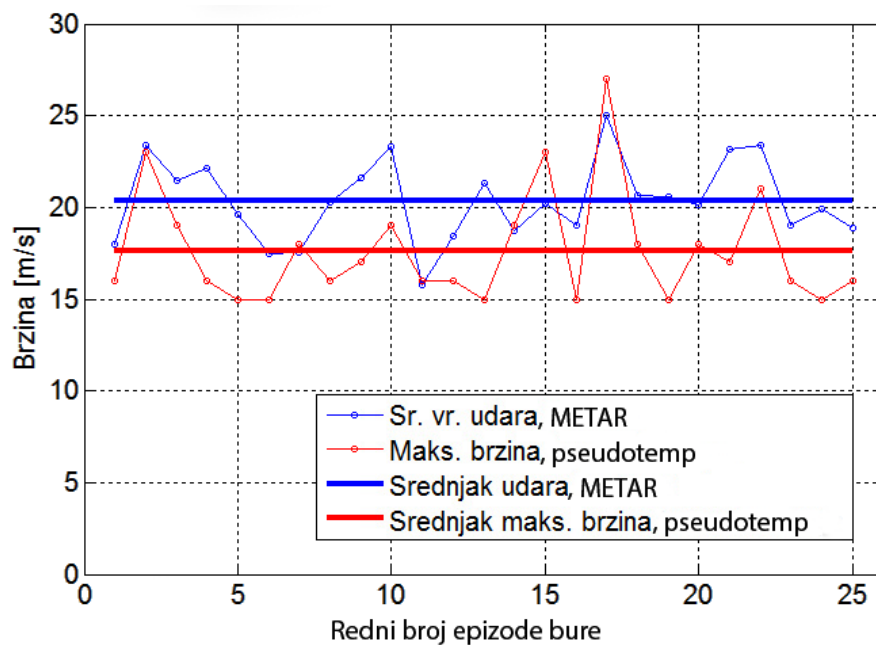
#### 5.4. *Usporedba podataka iz pseudotempa s podacima iz METAR izvješća*

Kod prognoziranja bure na ZLD-u prognostičari se, između ostalog, služe podacima numeričkog modela ALADIN. Njima je vrlo bitno znati povezanost podataka na osnovi pseudotempa s onim izmjerenim pri tlu kako bi unaprijedili svoju prognozu. Godine iskustva naučile su ih raznim empirijskim „trikovima“ pri prognoziranju bure iz podataka numeričkog modela. No, do sada nije provedena analiza koja bi pokazala koliko su njihovi postupci ispravni. Cilj ovog potpoglavlja potvrditi je ili opovrgnuti njihove iskustvene metode.

Analizu započinjemo usporedbom maksimalne brzine bure u pseudotempu sa srednjim udarom bure prema prizemnim izmjerenim podacima za SM-buru. Naime, jedna od empirijskih metoda kojima se prognostičari tamo služe za prognozu SM-bure jest da procjenu udara pri tlu daju na temelju maksimalne brzine bure iz pseudotempa do otprilike 1500 m visine (ovu ćemo metodu u daljnjem tekstu označavati s ET1 – empirijska teza br. 1). Slika 17 prikazuje dva niza podataka. Plavi niz su srednje vrijednosti udara iz METAR izvješća za svaku epizodu, a crveni predstavlja maksimalnu brzinu iz pseudotempa do 11. nivoa (oko 1500 m) za istu tu epizodu. Srednje vrijednosti svakog niza prikazane su odgovarajućim pravcima na slici. Dodatno, lijevi graf Slike D3 u dodatku prikazuje dijagram raspršenja ovog niza s polinomom linearne regresije drugog stupnja. Pripadni koeficijenti kao i postotak varijance objašnjen regresijom ( $r^2$ ) prikazani su na samoj slici. Ono što na prvi pogled možemo vidjeti je da su nizovi dosta slični - koeficijent korelacije im iznosi 0,68. Srednja vrijednost plavog niza je  $16,9 \text{ m s}^{-1}$ , a crvenog  $9,4 \text{ m s}^{-1}$ . Srednje odstupanje ova dva niza je  $7,5 \text{ m s}^{-1}$  i to nikako ne potvrđuje početnu tezu. Ali budući da se u ovome nizu nalaze baš sve SM-bure, ima mnogo onih koje ALADIN pokazuje samo na prvih nekoliko nivoa. Neke jedva da i pokazuje, a njih 4 uopće ne pokazuje (potpoglavlje 5.1.). Ovo se najbolje može vidjeti pogledaju li se pseudotempovi na slikama 3a i 4. Dok na Slici 3a pseudotemp pokazuje izraženu SM-buru do otprilike 9 UTC, na Slici 4 ona jedva da se i vidi (iako je na toj slici prikazan vrlo granični slučaj između bure i burina, ovakav primjer pseudotempa može se javiti i kada stvarno tamo puše bura pa ovo možemo uzeti kao dobar primjer). Prognostičari će ET1 koristiti uglavnom u slučajevima kao na Slici 3a. Stoga ćemo u sljedećoj analizi u obzir uzeti samo takve slučajeve. Odabiremo kriterij da maksimalna brzina u pseudotempu mora biti  $\geq 15 \text{ m s}^{-1}$ . Uzorak je sada veličine 25 (u daljnjem ćemo ga tekstu označavati s kraticom U25), a rezultat je prikazan na Slici 18. Koeficijent korelacije



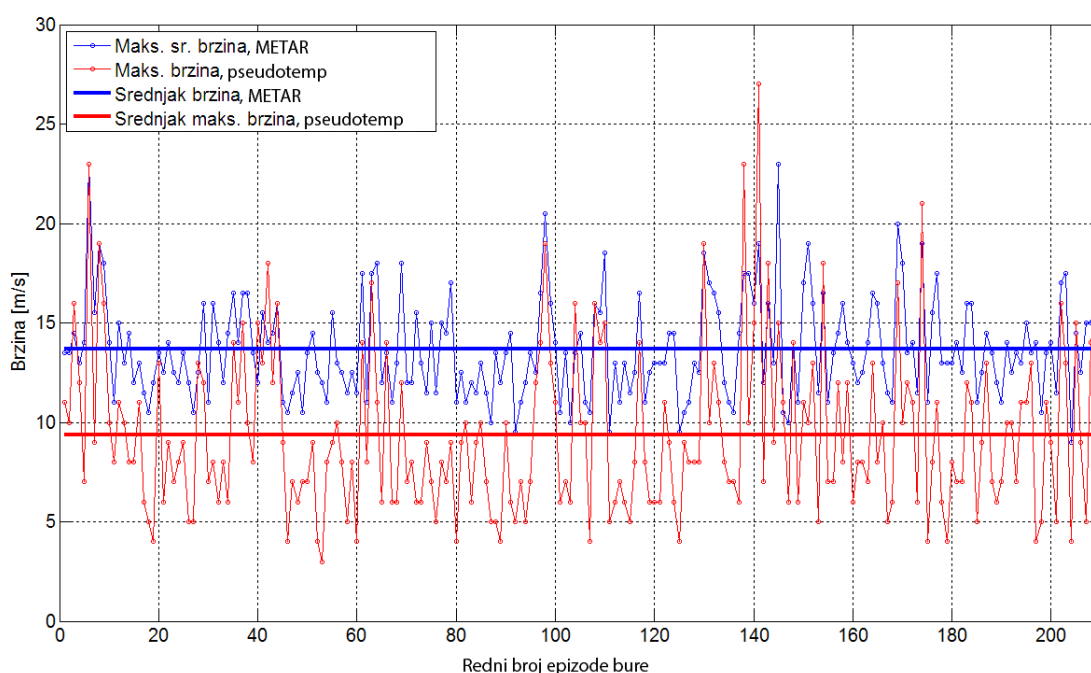
Slika 17. Srednje vrijednosti udara iz METAR izvješća svake epizode i pripadna srednja vrijednost (plavo). Maksimalna brzina iz pseudotempa do 11. nivoa (oko 1500 m) i pripadna srednja vrijednost (crveno).



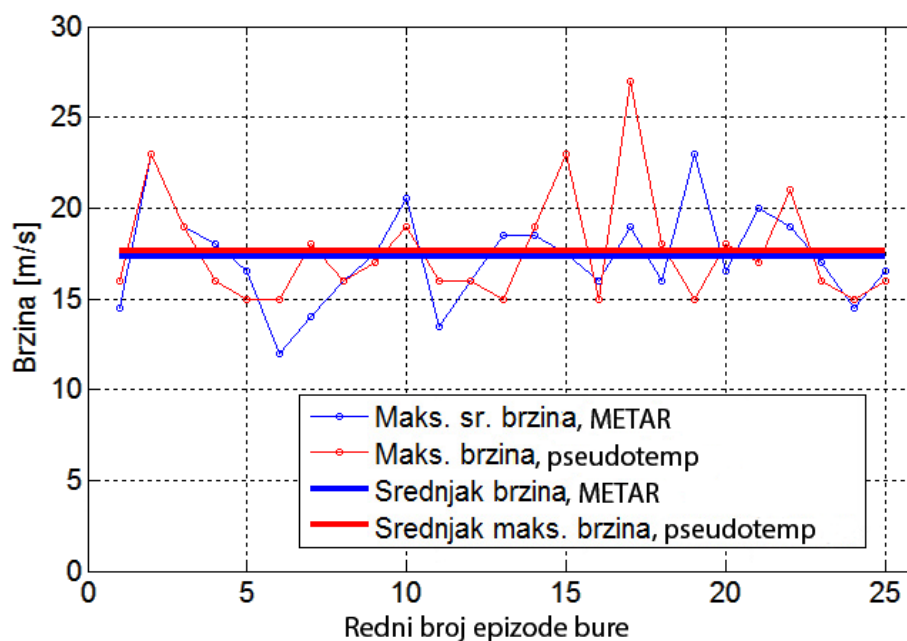
Slika 18. Isto kao i slika 17, ali za one epizode u kojima je pseudotemp dao maks. brzinu  $\geq 15 \text{ m s}^{-1}$ .

sada se smanjio na 0,59. Razlika srednje vrijednosti nizova sa Slike 18 iznosi  $2,7 \text{ m s}^{-1}$  što više nije toliko značajno. Možemo reći da će ET1 u ovakvim slučajevima SM-bure dati vrlo dobru procjenu udara pri tlu.

Prognostičarima je korisna informacija i o maksimalnom  $U_{10}$  pa ćemo provjeriti kako se maksimalni  $U_{10}$  pojedinih epizoda odnosi prema maksimalnoj brzini iz pseudotempa. Slike 19 i 20, analogne su Slikama 17 i 18. Znači, kod nizova na Slici 20 opet je korišten U25. Dodatak (desni graf Slike 3D) sadrži dijagrame raspršenja nizova sa Slike 19 uz pravac linearne regresije (polinomi višeg stupnja nisu davali poboljšanje prilagodbe veće od 5 % u odnosu na pravac). U prvom slučaju (Slika 19) razlika srednje vrijednosti nizova iznosi  $4,3 \text{ m s}^{-1}$ . Koeficijent korelacije veći je i iznosi 0,71. U drugome slučaju (Slika 20), razlika srednje vrijednosti nizova jednaka je  $0,3 \text{ m s}^{-1}$ . Gotovo su identični, ali koeficijent korelacije sada iznosi samo 0,42 što znači da će za pojedine epizode razlike biti značajne. U ovome je slučaju za samo 8 % slučajeva bure razlika veća od  $5 \text{ m s}^{-1}$  što je dobar rezultat, ali budući da je uzorak mali, signifikantnost ovog podatka nije velika. Ono što jest sigurno je da će prognostičar, u prosjeku, najmanje pogriješiti kažu li da će maksimalni  $U_{10}$  približno odgovarati maksimalnoj brzini iz pseudotempa u slučajevima SM-bure slične onima iz U25. Općenito, za svaki slučaj SM-bure, prognostičar će najmanje pogriješiti prognozira li da će maksimalna srednja brzina pri tlu biti oko  $4 \text{ m s}^{-1}$  manja od maksimalne iz pseudotempa.

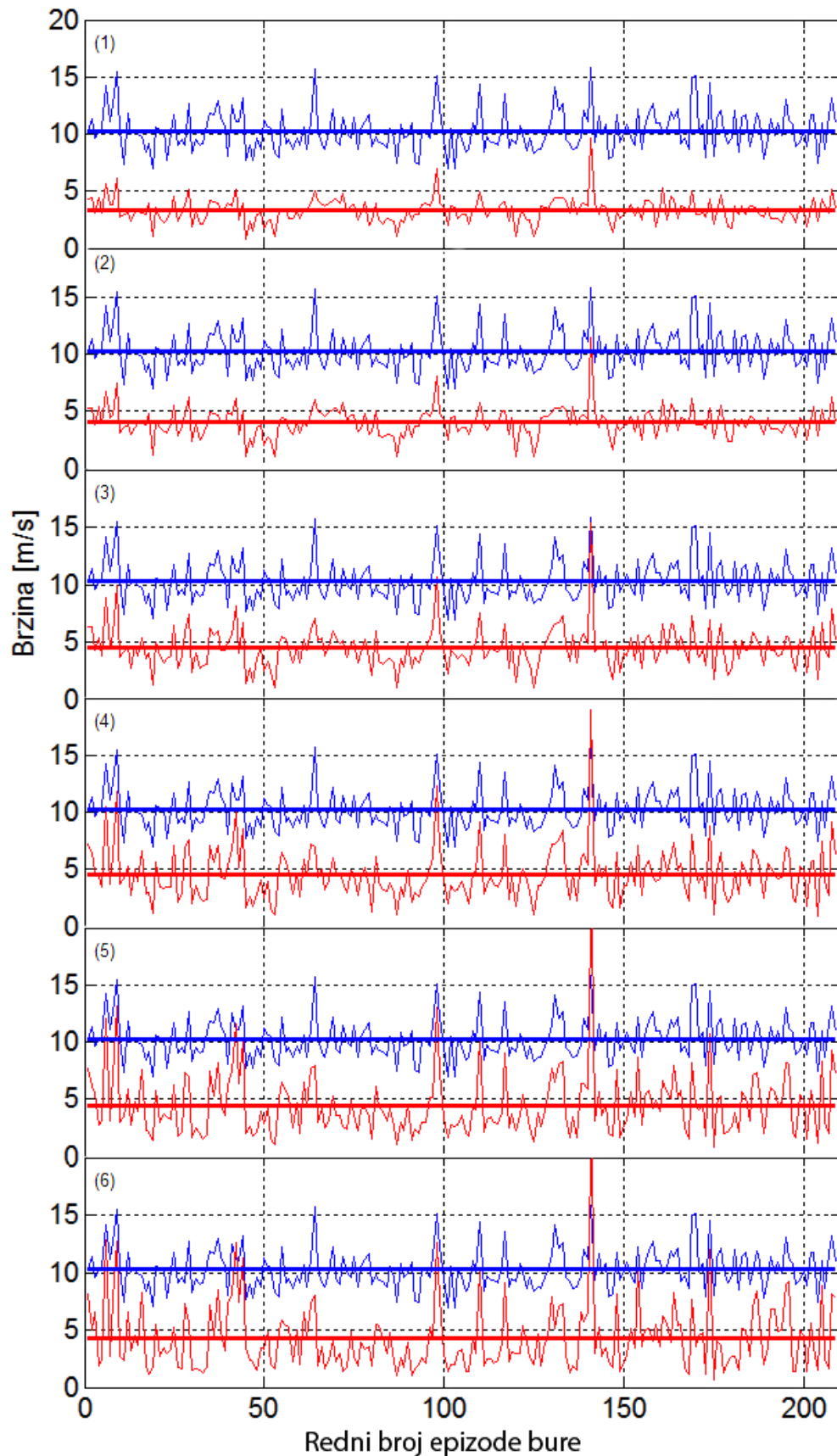


Slika 19. Kao i slika 17, ali za maksimalan  $U_{10}$ .

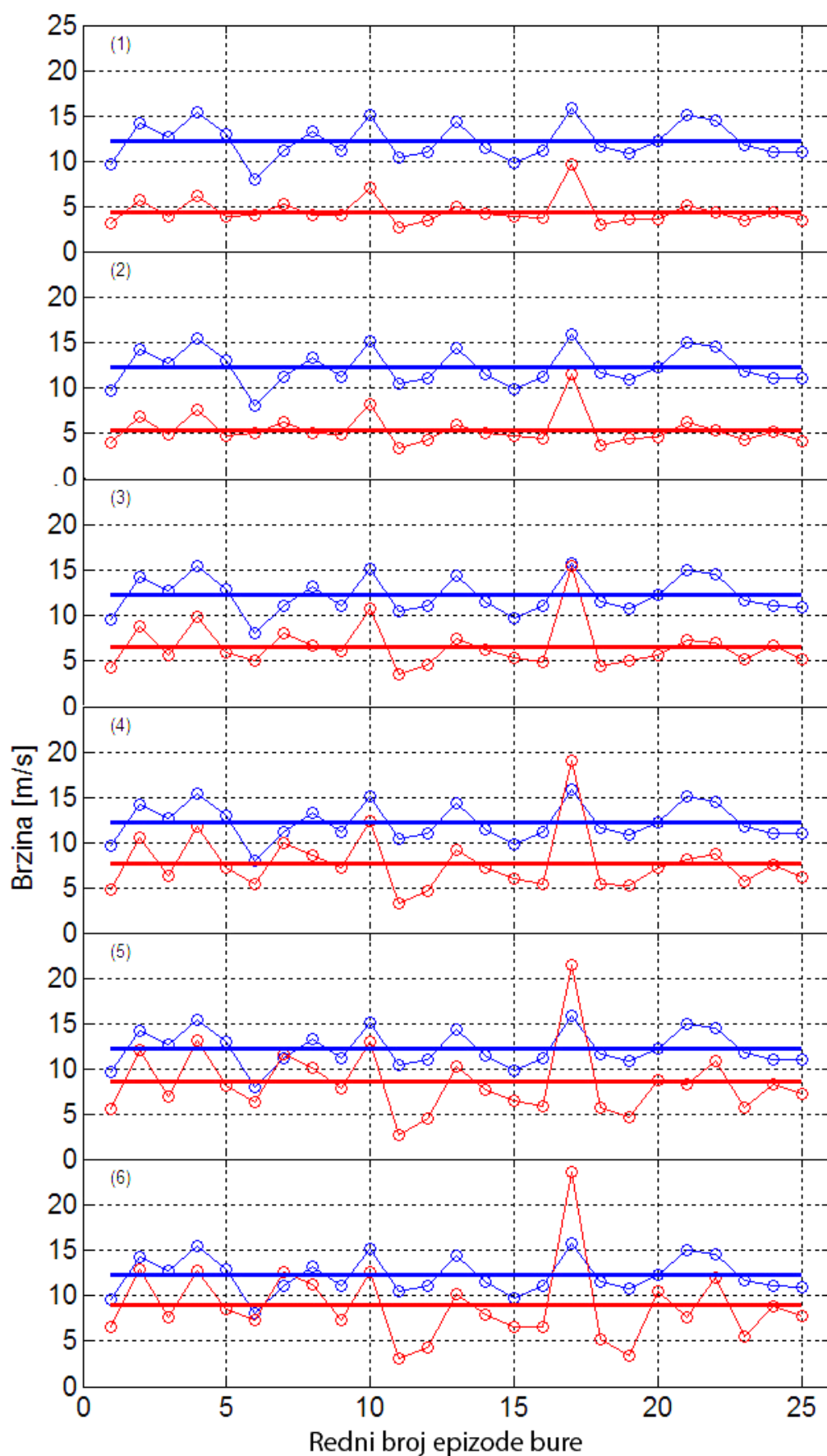


Slika 20. Kao slika 18, ali za maksimalni  $U_{10}$ .

Druga empirijska metoda kojom se prognostičari na ZLD-u služe je da uzmu brzinu na prvom nivou pseudotempa, pomnože ju s dva i dobiju dobro procjenu stvarne  $U_{10}$  (ET2 – empirijska teza br. 2). Stoga ćemo razmotriti vezu između srednje brzine na visinskim nivoima pseudotempa sa srednjom  $U_{10}$  za svaku epizodu SM-bure. Pri tome si postavljamo dva pitanja: 1) Koji nivo iz pseudotempa najbolje odgovara prizemnim mjerenjima? 2) Kakva je veza brzine između prvog nivoa u pseudotempu s mjerenjima pri tlu? Cjelokupna će analiza biti napravljena na uzorku od svih epizoda 209 SM-bure. Vremenski nizovi prikazani su na Slici 21. Plavo su prizemna mjerenja (uvijek isti niz), a crveno podaci iz pseudotempa od prvog do šestog nivoa, redom. Dijagrami raspršenja nizova prikazani su u dodatku na Slici D4a. Tablica 11 sadrži koeficijente korelacije tih nizova s mjerenim nizom kao i njihove srednjake. Iz ovoga se vidi kako četvrti nivo iz pseudotempa, koji približno odgovara nadmorskoj visini od 280 m, najbolje opisuje mjerenja pri tlu. Isprva se čini čudno što se, nakon četvrtog nivoa, srednja brzina počinje smanjivati. To objašnjavamo činjenicom da postoje bure za koje pseudotemp daje sloj debljine i manji od 300 m. Stoga su u ovu analizu ušli i slučajevi kada bure uopće nije bilo ili je bura bila vrlo slaba na petom ili šestom nivou. Prognostičarima će zato korisnija biti analiza u koju ulaze samo one bure s dubinom puhanja većom od visine prvih šest nivoa. Da bismo to postigli, korišten je  $U_{25}$ . Rezultati te analize nalaze se u tablici 12, vremenski nizovi na Slici 22, a dijagrami raspršenja u dodatku na Slici D4b.



Slika 21. Veza između srednje brzine prizemnih mjerenja - plavo (uvijek isti niz) i srednje brzine visinskih nivoa iz pseudotempa - crveno. Brojevi u zagradi označavaju broj nivoa. Horizontalne linije srednjaci su pripadnih nizova.



Slika 22. Kao i slika 21, ali za U25.

Tablica 11. Srednje vrijednosti nizova i koeficijenti korelacije s mjerenjima pri tlu za sve SM-bure. Nadmorske visine nivoa u zgradama su približne.

|                  | Srednja vrijednost [ $\text{m s}^{-1}$ ] | Koeficijent korelacije r |
|------------------|------------------------------------------|--------------------------|
| Mjerenja pri tlu | 10,28                                    | -                        |
| 1. nivo (127 m)  | 3,31                                     | 0,62                     |
| 2. nivo (150 m)  | 4,02                                     | 0,62                     |
| 3. nivo (200 m)  | 4,50                                     | 0,72                     |
| 4. nivo (280 m)  | 4,56                                     | 0,75                     |
| 5. nivo (400 m)  | 4,48                                     | 0,73                     |
| 6. nivo (500 m)  | 4,28                                     | 0,68                     |

Tablica 12. Kao i tablica 11, ali za U25.

|                  | Srednja vrijednost [ $\text{m s}^{-1}$ ] | Koeficijent korelacije r |
|------------------|------------------------------------------|--------------------------|
| Mjerenja pri tlu | 12,20                                    | -                        |
| 1. nivo (127 m)  | 4,39                                     | 0,71                     |
| 2. nivo (150 m)  | 5,27                                     | 0,72                     |
| 3. nivo (200 m)  | 6,62                                     | 0,75                     |
| 4. nivo (280 m)  | 7,70                                     | 0,76                     |
| 5. nivo (400 m)  | 8,50                                     | 0,74                     |
| 6. nivo (500 m)  | 8,89                                     | 0,68                     |
| 7. nivo (650 m)  | 8,95                                     | 0,59                     |
| 8. nivo (850 m)  | 8,56                                     | 0,49                     |

U tablici 12 prikazani su nivoi sve do osmog kako bi se uhvatio onaj na kojemu su srednje brzine najveće. Vidimo da je četvrti nivo opet najkoreliraniji s mjerenjima i da je po srednjoj vrijednosti nivo 7 najbliži, ali mu je korelacija dosta manja. Stoga, u općenitom slučaju za sve SM-bure, najbolja procjena brzine pri tlu dobije se korištenjem četvrtog visinskog nivoa iz pseudotempa. Iz tablice 12 se vidi da brzine iz pseudotempa na prvom nivou treba pomnožiti s tri, a ne s dva kako bi se dobila dobra procjena  $U_{10}$  pri tlu.

Posljednja stvar koja će u ovome radu biti razmotrena, veza je između maksimalne brzine iz pseudotempa na pojedinim nivoima s mjerenjima pri tlu. Naime, želimo vidjeti stoji li ET2 ako ju primijenimo na ovaj način. Tablica 13 prikazuje pripadnu statistiku, vremenski nizovi prikazani su na Slici 23, a dijagrami raspršenja na Slici D5a u dodatku. Četvrti nivo opet je najkoreliraniji s mjerenjima, a šesti nivo najbliži je  $U_{10}$  po srednjoj brzini. Pogledamo li razliku prvog nivoa iz pseudotempa i podataka iz METAR-izvještaja vidimo kako je ovaj

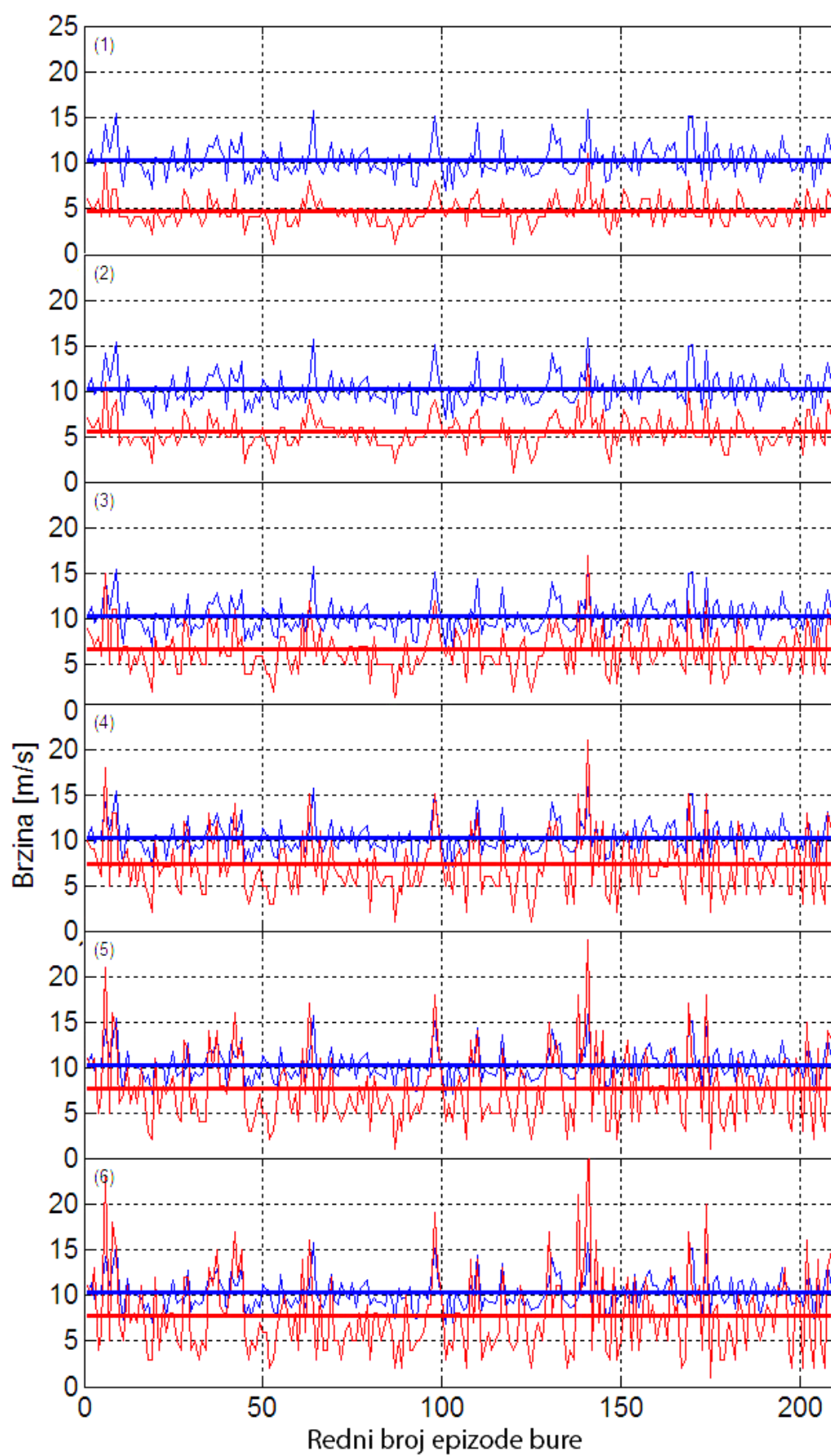
prvi manji za približno dva puta. Ovime možemo potvrditi ispravnost ET2 ukoliko se ona primjeni na ovaj način. No, ovako se može prognozirati samo srednja brzina pojedine epizode SM-bure, ali ne i brzine u svakom pojedinom terminu. Konačno, tablica 14 prikazuje rezultate iste te analize dobivene na U25, Slika 24 nizove, a Slika D5b u dodatku dijagrame daje pripadne raspršenja. Četvrti nivo je sada po srednjoj vrijednosti gotovo identičan mjerenjima te je, uz drugi nivo, i najkoreliraniji s njima. Znači, želimo li prognozirati maksimalni  $U_{10}$  pri tlu, pogledat ćemo srednju brzinu na četvrtom nivou i reći da će brzina pri tlu biti otprilike jednaka onoj na četvrtom nivou.

Tablica 13. Kao i tablica 12, ali za maksimalnu brzinu iz pseudotempa.

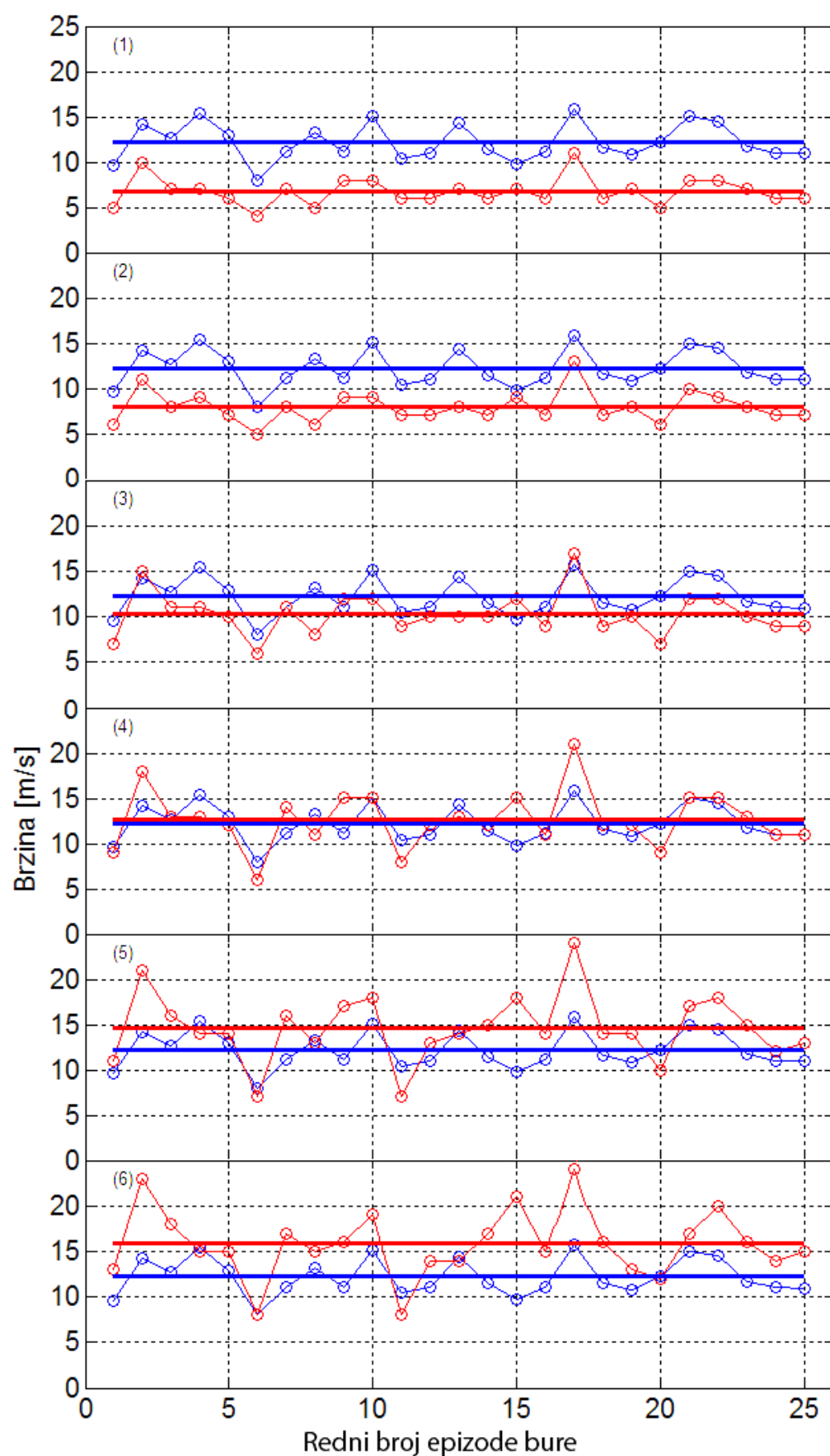
|                  | Srednja vrijednost [ $\text{m s}^{-1}$ ] | Koeficijent korelacije r |
|------------------|------------------------------------------|--------------------------|
| Mjerenja pri tlu | 10,28                                    | -                        |
| 1. nivo (127 m)  | 4,60                                     | 0,63                     |
| 2. nivo (150 m)  | 5,52                                     | 0,65                     |
| 3. nivo (200 m)  | 6,63                                     | 0,66                     |
| 4. nivo (280 m)  | 7,32                                     | 0,68                     |
| 5. nivo (400 m)  | 7,67                                     | 0,67                     |
| 6. nivo (500 m)  | 7,75                                     | 0,65                     |
| 7. nivo (650 m)  | 7,72                                     | 0,62                     |

Tablica 14. Kao i tablica 13, ali za U25.

|                  | Srednja vrijednost [ $\text{m s}^{-1}$ ] | Koeficijent korelacije r |
|------------------|------------------------------------------|--------------------------|
| Mjerenja pri tlu | 12,20                                    | -                        |
| 1. nivo (127 m)  | 6,76                                     | 0,67                     |
| 2. nivo (150 m)  | 7,92                                     | 0,68                     |
| 3. nivo (200 m)  | 10,32                                    | 0,64                     |
| 4. nivo (280 m)  | 12,64                                    | 0,68                     |
| 5. nivo (400 m)  | 14,60                                    | 0,63                     |
| 6. nivo (500 m)  | 15,88                                    | 0,59                     |



Slika 23. Kao i slika 21 samo za maksimalnu brzinu visinskih nivoa iz pseudotempa.



Slika 24. Kao i slika 23, ali za U25

## 6. Zaključak

U ovom su radu proučavane razlike između SM-bure i N-bure, njihova klimatologija te usporedba između podataka iz meteorološkog modela ALADIN s mjerenjima pri tlu na području zračne luke Dubrovnik. Analizom je ustanovljeno kako godišnji hod puhanja bure ima U-razdiobu s minimumom u toplom dijelu, a maksimumom u hladom dijelu godine. Iznimka je studeni u kojem postoji sekundarni minimum. Uzrok tomu ostaje otvoreno pitanje. Dnevni hod bure ima oblik vala s jednim minimumom (danju) i maksimumom (noću). Analizom dnevnog hoda, posebno za oba tipa bure, dobiveno je da za SM-buru oblik ostaje isti, dok je kod N-bure on gotovo uniforman. Nadalje, bura je dugotrajnija u hladnom dijelu godine što je posebno izraženo kod SM-bure. Uzrok tome leži u različitom gradijentu temperature kopno-more ljeti i zimi te obalnoj cirkulaciji koja je izraženija ljeti.

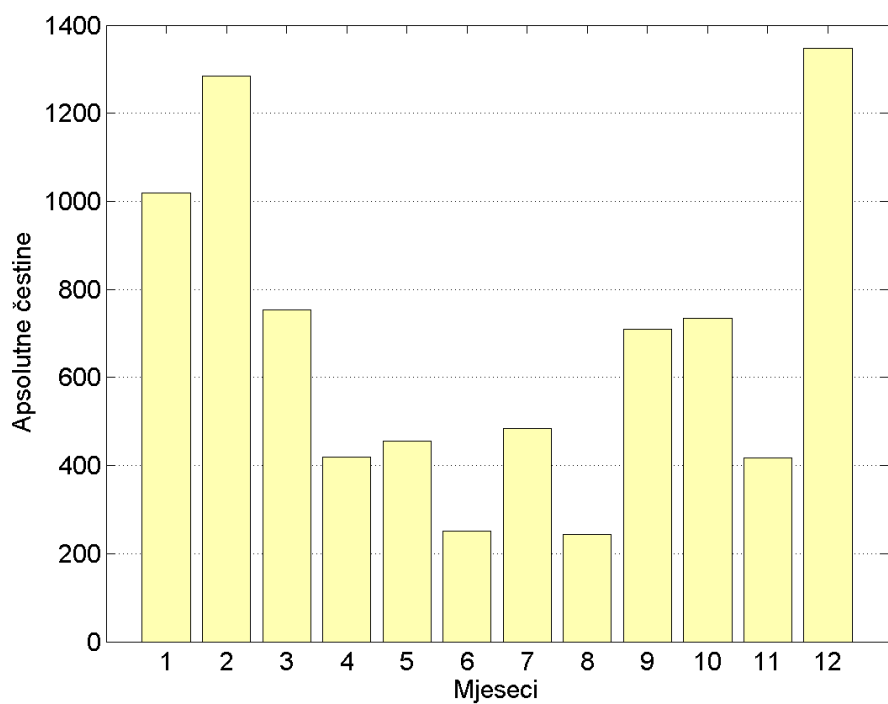
N-bura ima više zastupljenih smjerova vjetra (iz sva četiri kvadranta), a najučestaliji je  $0^\circ$  - sjever. Kod SM-bure zastupljen je uglavnom samo prvi kvadrant, uz ponešto smjerova iz drugog. Najučestaliji smjer ovdje je  $20^\circ$  što odgovara smjeru planine. Varijabilnost smjera kroz epizode veća je kod N-bure čija je srednja vrijednost standardne devijacije oko  $27^\circ$ , a za SM-buru oko  $7^\circ$ . Desetominutne srednje brzine veće su kod SM-bure, a njihova je varijabilnost kroz epizodu manja. Srednjak im je nešto veći od  $10 \text{ m s}^{-1}$ , a N-buri nešto manji od  $7 \text{ m s}^{-1}$ . N-bura slijedi Gama razdiobu, dok za SM-buru nijedna razdioba ne odgovara, ali najbliža je Burrova. Srednja vrijednost udara veća je kod SM-bure (oko  $18 \text{ m s}^{-1}$ , nasuprot  $15 \text{ m s}^{-1}$  za N-buru), ali je njihova razlika s desetominutnim srednjim brzinama manja nego za N-buru ( $9 \text{ m s}^{-1}$ , naspram skoro  $13 \text{ m s}^{-1}$  kod N-bure). Zanimljiva stvar uočava se kod maksimalnih udara. Naime, njihova je srednja vrijednost čak blago veća kod N-bure. Ovime, također, potvrđujemo rezultate koje je dobio Drobac (2006).

U posljednjem su dijelu rada bile provjerene dvije empirijske metode koje prognostičari koriste pri prognozi bure. Prva od njih je da maksimalna brzina bure u pseudotempu do otprilike 1500 m visine daje procjenu udara pri tlu. To vrijedi samo za SM-buru. Analizom provedenom na svim epizodama bure, dobiveno je kako je prosječna razlika te dvije brzine oko  $7,5 \text{ m s}^{-1}$  što nikako ne potvrđuje spomenutu tezu. No, ako se ona napravi na uzorku koji sadrži samo one bure kod kojih je maksimalna brzina u pseudotempu veća ili jednaka  $15 \text{ m s}^{-1}$  (obično se na takve bure ta metoda i primjenjuje) razlika iznosi oko  $2,5 \text{ m s}^{-1}$  što nije značajno i ispravnost ovako selektivne metode može se potvrditi. Druga empirijska metoda

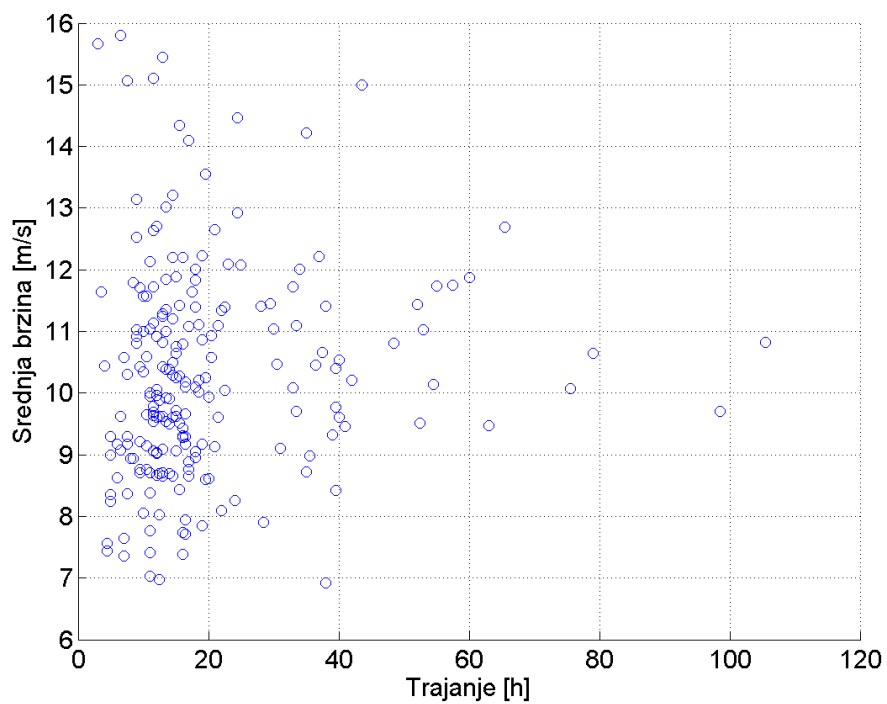
kojom se prognostičari služe je da uzmu brzinu na prvom nivou pseudotempa, udvostruče i dobiju dobru procjenu stvarne desetominutne brzine pri tlu. Rezultati dobiveni ovdje pokazuju kako bi spomenute ulazne vrijednosti trebalo utrostručiti da se dobije dobra procjena stvarnih brzina. Udvostručiti bi trebalo srednju brzinu epizode iz pseudotempa ukoliko se želi dobiti stvarna maksimalna desetominutna brzina te epizode pri tlu. Također, dobiveno je da brzina na četvrtom visinskom nivou ALADIN-a daje najbolju procjenu stvarne brzine pri tlu. U svim slučajevima upravo je ta brzina bila najkoreliranija s mjerenjima.

Na samom kraju ukratko ćemo sažeti koja su glavna obilježja oba tipa bure i navesti koja su pitanja ostala neodgovorena. SM-bura ima veći srednjak desetominutnih brzina, veći srednjak udara i ujednačeniji smjer. Kod N-bure prisutne su veće varijacije i smjera i brzine, a maksimalni udari usporedivi su s onima za SM-buru. U jednom vremenskom intervalu udari N-bure mogu biti relativno bezopasni da bi onda naglo ojačali do olujnih jakosti, a smjer iz sjeveroistočnog okrenuti u, npr., jugozapadni. Sva ju ta svojstva čine teže predvidivom i opasnijom za odvijanje zrakoplovnog prometa u zračnoj luci Dubrovnik. Jedna od nerazjašnjenih stvari ostaje razlika između bure i burina (poglavlje 4) iz koje bi se moglo dosta saznati o dinamici slabe bure. Također, informacija o vremenskoj razlici početka i kraja bure iz pseudotempa i one iz METAR izvješća bila bi korisna tamošnjim prognostičarima. Svakako najbitnije što ovdje nedostaje su radiosondažna mjerenja. Za daljnji rad ostaje mogućnost korištenja radiosondažnih mjerenja iz Zadra, dok bi se udari iz pseudotempa mogli procijeniti metodom kao u Belušić i Klaić (2004).

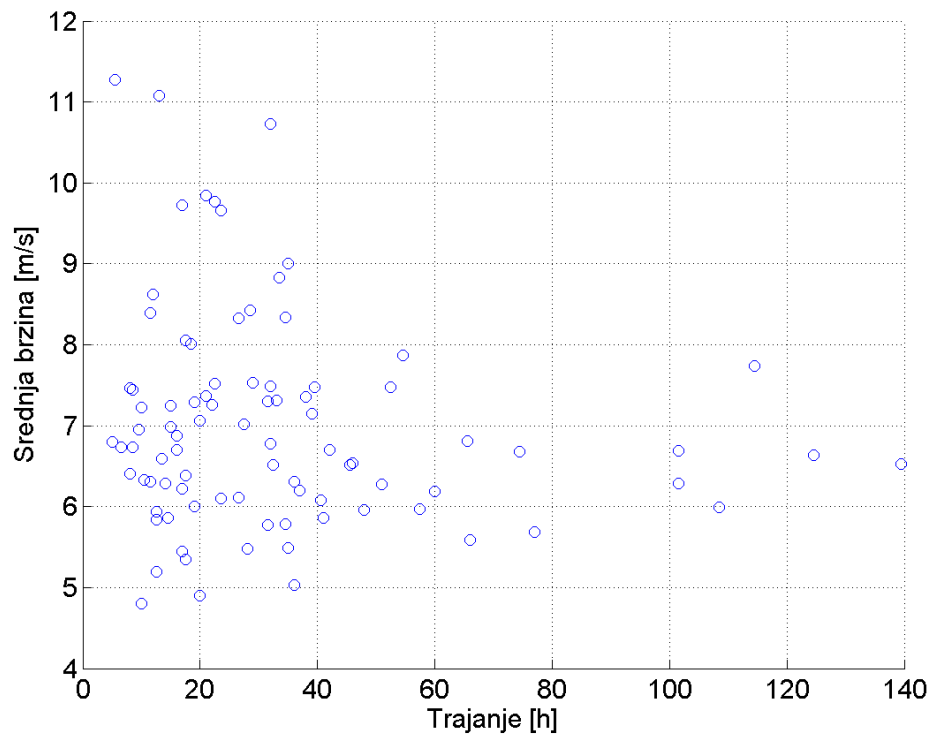
## Dodatak



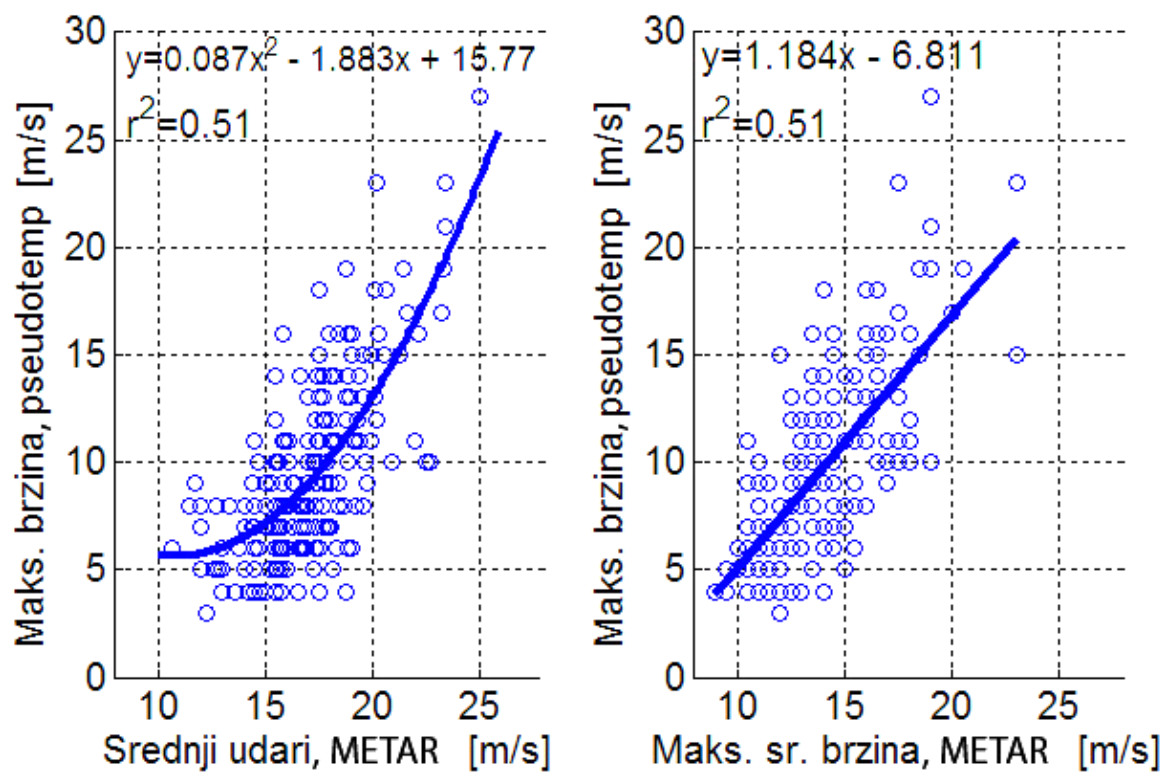
Slika D1. Učestalost SM-bure po mjesecima. Sve ostalo isto kao u Slikama 6a i 6b.



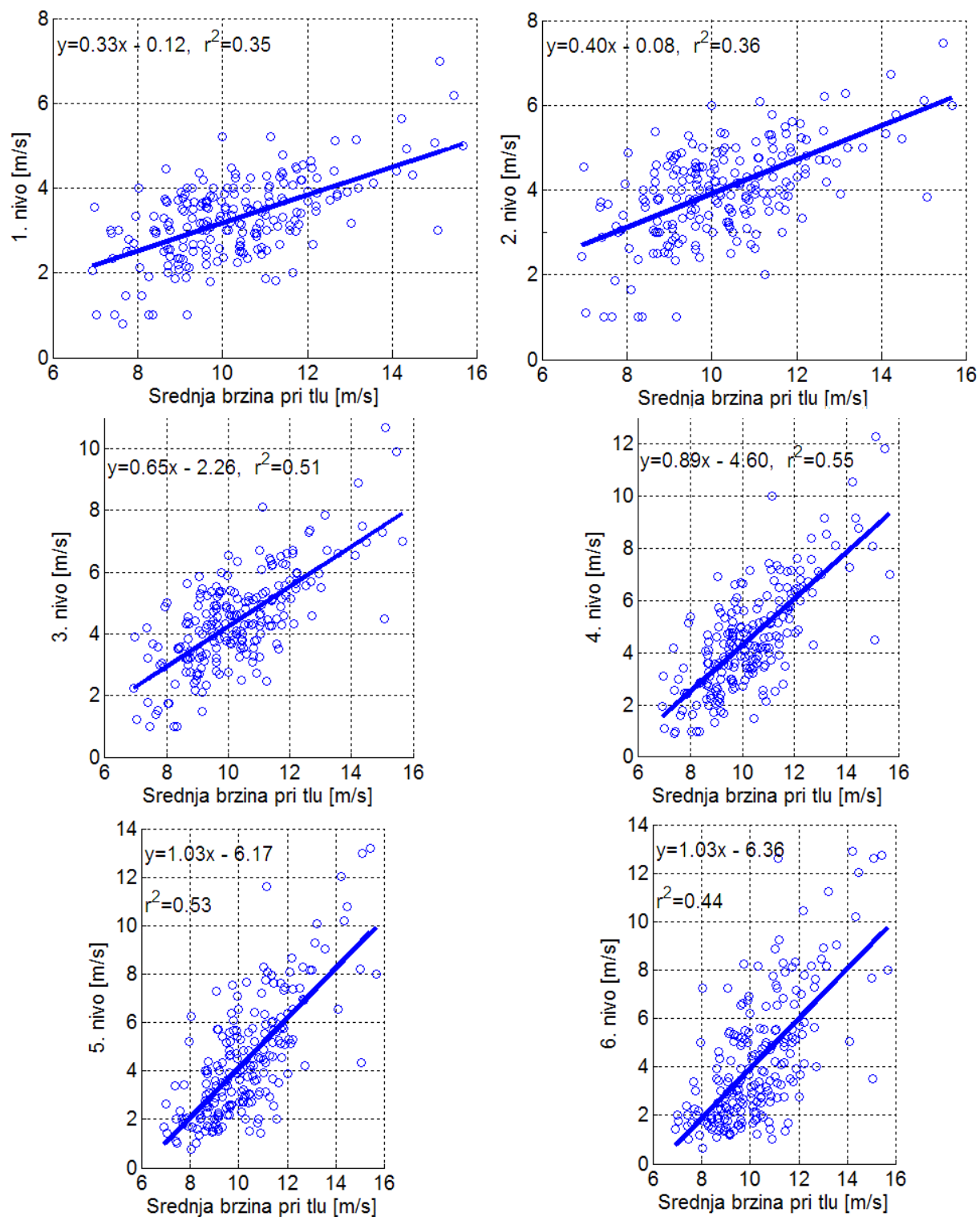
Slika D2a. Ovisnost srednje brzine o trajanju epizode SM-bure.



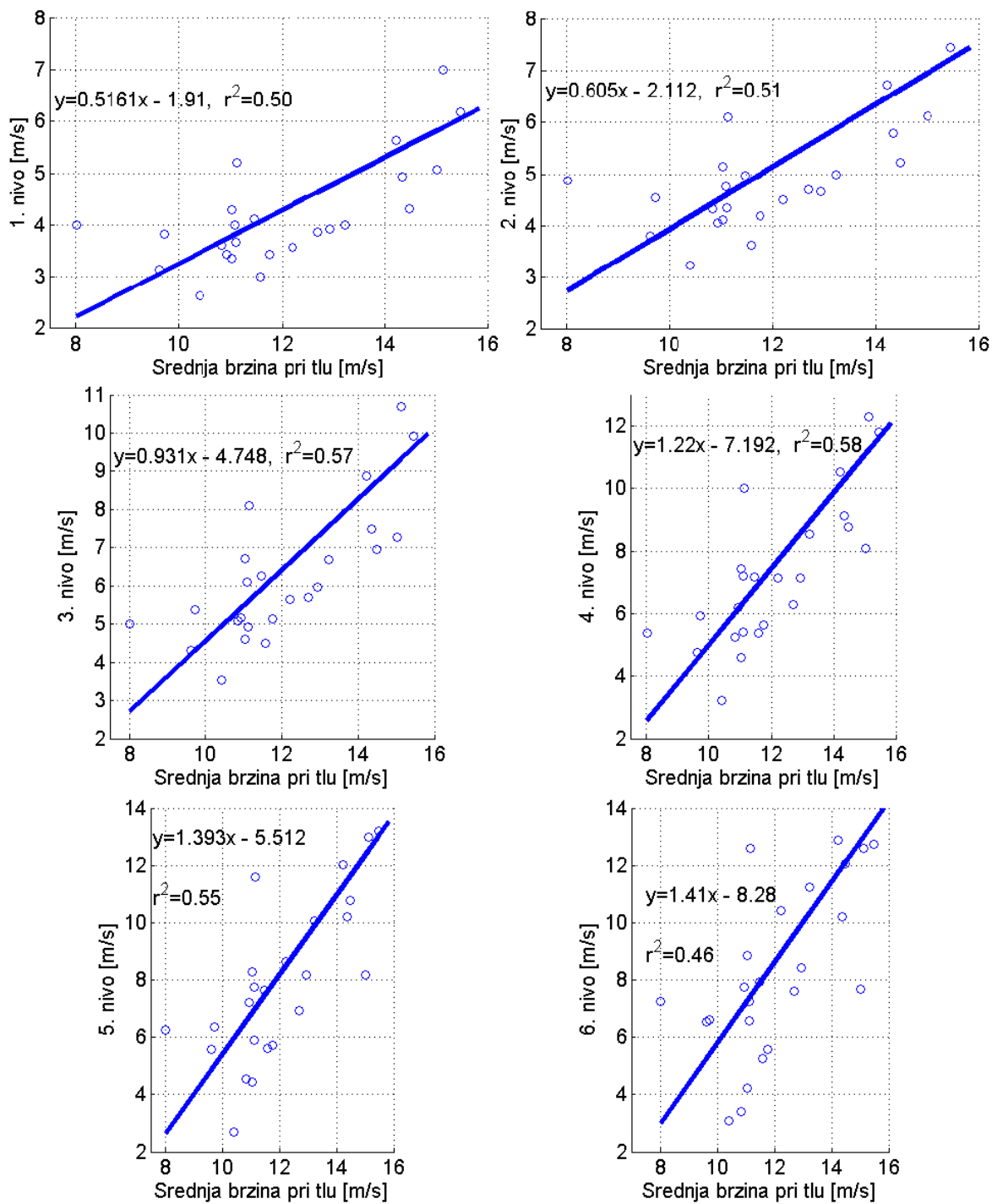
Slika D2b. Kao i D2a, ali za N-buru.



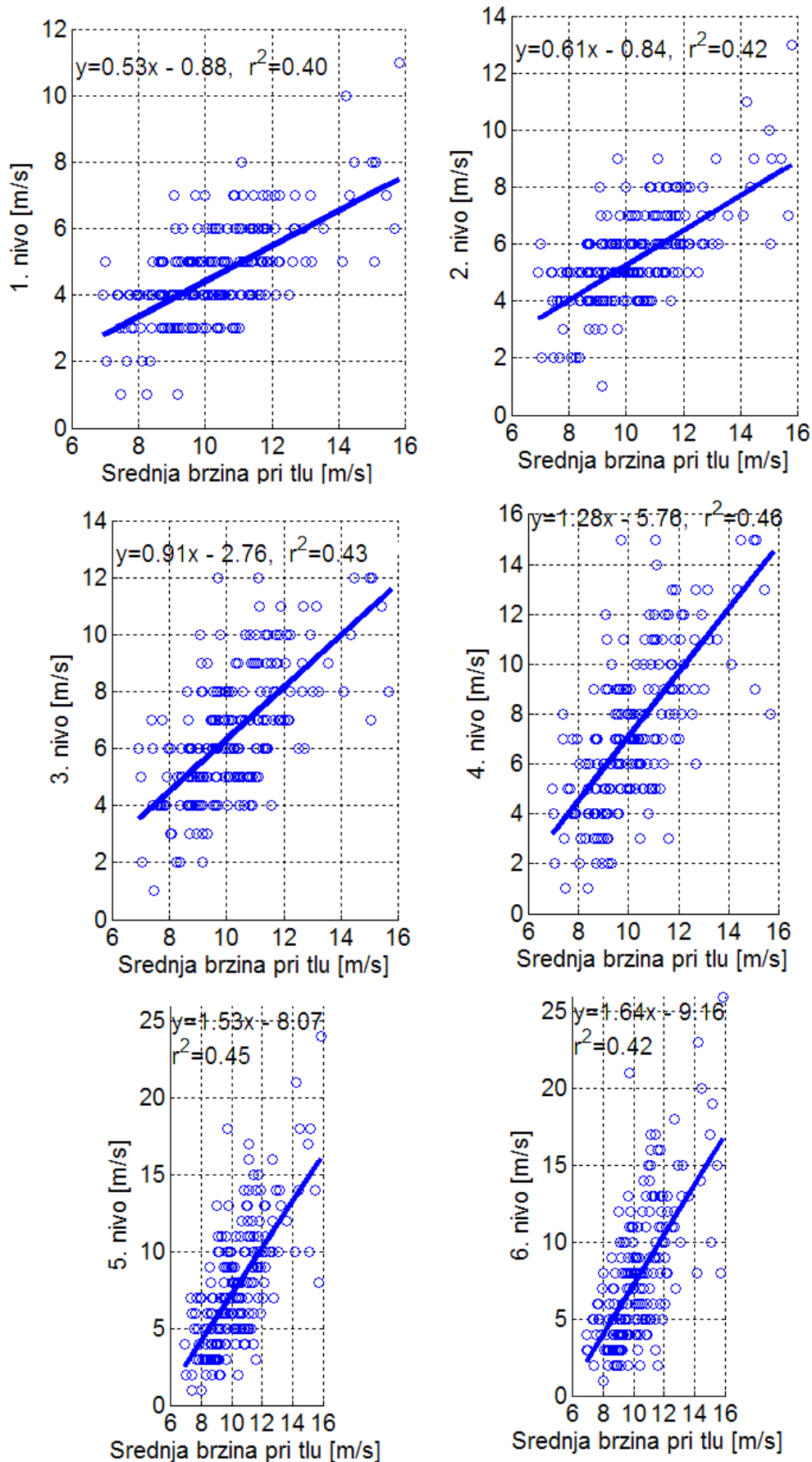
Slika D3. Dijagrami raspršenja nizova naznačenih na osima s pripadnim polinomima regresije oblika prikazanog na samoj slici i ukupnom varijancom objašnjenom regresijom ( $r^2$ ).



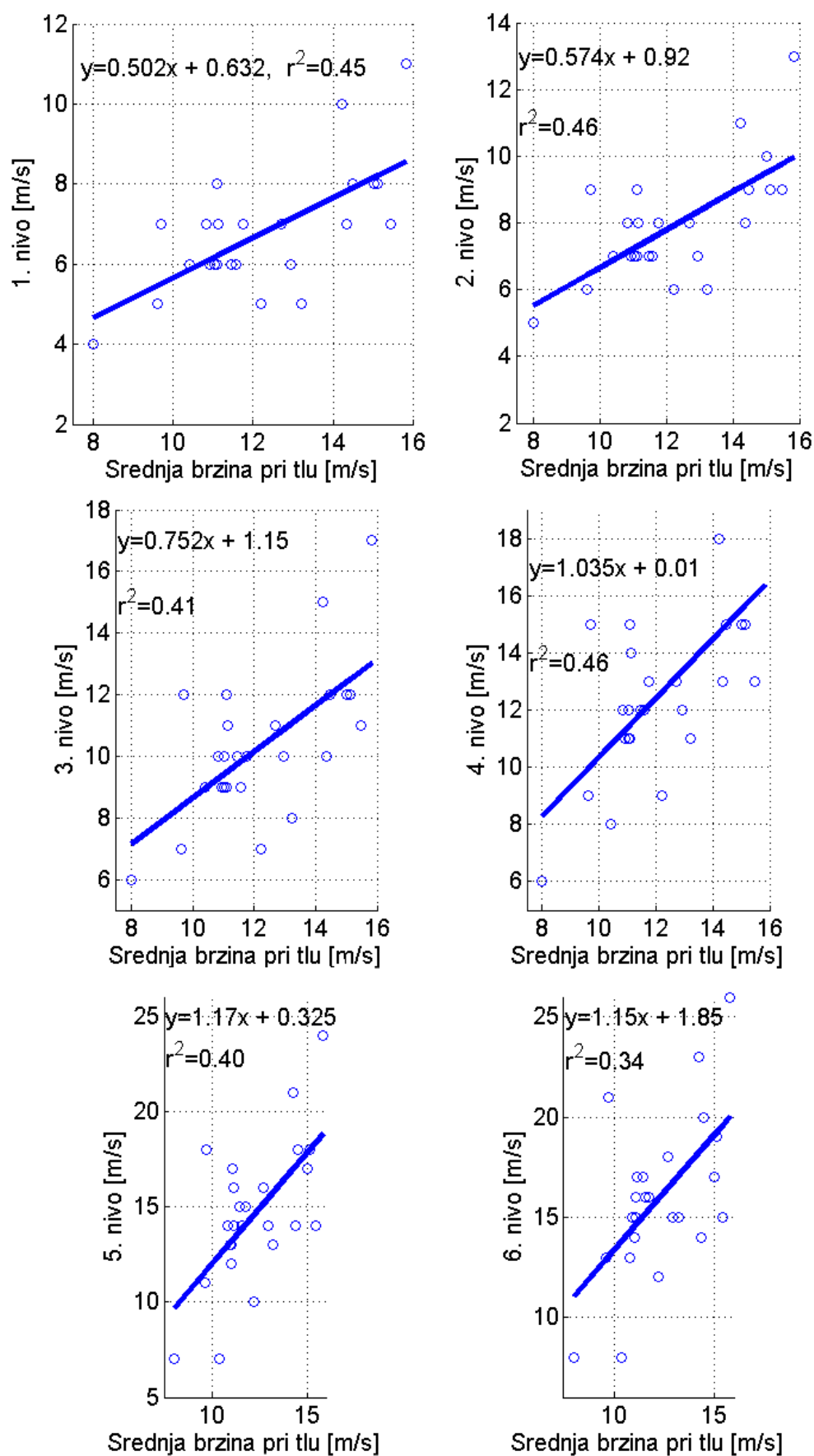
Slika D4a. Dijagrami raspršenja nizova sa slike 21. Ostalo kao na D3.



Slika D4b. Kao i D4a, ali za U25.



Slika D5a. Dijagrami raspršenja nizova sa slike 23. Ostalo kao na D3.



Slika D5b. Isto kao D5a, ali za U25.

## Literatura

- Bašić, T.: Utjecaj orografije na buru na području zračne luke Dubrovnik simuliran WRF – ARW modelom. Diplomski rad. Zagreb: Prirodoslovno-matematički fakultet, 2010. 111 str.
- Belušić, D.; Klaić, Z.: Estimation of bora wind gusts using a limited area model. *Tellus*. Vol. 56A (2004), str. 296-307.
- Burr, I. W.: Cumulative frequency functions. *The Annals of Mathematical Statistics*. Vol. 13 (1942), str. 215–232.
- Drobac, M.: Neke specifičnosti ponašanja bure na području aerodroma Dubrovnik. *Jadranska Meteorologija*. Vol. 51 (2006), str. 10-24.
- Enger, L.; Grisogono, B.: The response of bora-type flow to sea surface temperature. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* Vol. 124 (1998), str. 1227–1244.
- Gelo, B. i dr.: Meteorološki pojmovnik i višjejezični rječnik, hrvatski, engleski, njemački i francuski jezik. Zagreb: DHMZ i HINUS, 2005. 655 str.
- Grisogono, B.; Belušić, D.: A review of recent advances in understanding the meso- and microscale properties of the severe Bora wind. *Tellus*. Vol. 61A (2009) str. 1-16.
- Horvath, K.; Bajić, A.; Ivatek-Šahdan, S.: Dynamical Downscaling of Wind Speed in Complex Terrain Prone To Bora-Type Flows. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. Vol. 50 (2011), str 1676-1691.
- Jambunathan, M. V.: Some Properties of Beta and Gamma Distributions. *The Annals of Mathematical Statistics*. Vol. 25 (1954), str. 401-405.
- Klaić, Z.; Pasarić, Z.; Tudor, M.: On the interplay between sea-land breezes and Etesian winds over the Adriatic. *Journal of Marine Systems*. Vol. 78 (2009), str. 101-118.
- Makjanić, B.: On the diurnal variation of the bora wind speed. *Papers*. Vol. 349 (1970), str. 33-92.
- Penzar, B.; Makjanić, B.: Uvod u opću klimatologiju. Zagreb: Sveučilišna naklada Liber, 1978. 206 str.

Poje, D.: Bura i Burin u Splitu. *Hrvatski meteorološki časopis*. Vol. 30 (1995), str 1-19.

Sijerković, M.: Bura goropadnica. Rijeka: Adamić, 2003. 139 str.

Smith, R. B.: Aerial observations of Yugoslavian bora. *Journal of the Atmospheric Sciences*. Vol. 44 (1987), str. 269-297.

Vučetić, M.; Vučetić, V.: Vrijeme na Jadranu. Zagreb: Fabra, 2002. 129 str.