

KARAKTERISTIKE BURE U LOKALNIM I MEZORAZMJERIMA

On Local and mesoscale Characteristics of Bora

VIŠNJA VUČETIĆ

Republički hidrometeorološki zavod SRH, Zagreb

Primljeno 19. rujna 1984., u konačnom obliku 4. ožujka 1985.

Sažetak: Prikazana je analiza situacije s burom 7. 1. 1982. na području sjevernog Jadrana, koja je bila karakterizirana prodorom hladnog i suhog zraka. To je uspoređeno sa situacijom 6. 3. 1982, kojoj je prethodila ciklogeneza u Genovskom zaljevu. Analiza vertikalne strukture u ožujskoj situaciji je pokazala jaču turbulenciju u sloju bure ispod inverzije, dok je u siječnju turbulencija jača iznad tog sloja. Kinematičkom metodom je izračunato polje relativne vrtložnosti, divergencije i vertikalne brzine na području Jugoslavije na standardnim izobarnim plohama 850, 700 i 500 mbar, kao i vertikalna gibanja uvjetovana orografijom. Pokazano je da se iznad sjevernog Jadrana u donjoj troposferi pojavljuju u siječnju silazna gibanja, a u ožujku uzlazna gibanja. Međutim, silazna gibanja pri tlu u obje situacije rezultat su prisilnih orografskih gibanja.

Ključne riječi: Bura; Vertikalna struktura; Polje relativne vrtložnosti, horizontalne divergencije i vertikalne brzine.

Abstract: Analysis is presented of a bora case on 7 January 1982 for the region of the north Adriatic, characterized by an outbreak of cold and dry air. This is compared with a bora case on 6 March 1982 which was preceded by cyclogenesis in the Gulf of Genoa. Analysis of the vertical structure on 6 March shows stronger turbulence inside the bora layer below the inversion, whereas in the January situation the turbulence is stronger above this layer. The fields of relative vorticity, divergence and vertical motions for the region of Yugoslavia, calculated by the kinematic method, are presented at standard isobaric levels 850, 700 and 500 mb, as well as the orographically induced vertical motions. It is shown that sinking motions appear on the northern Adriatic in the low troposphere on 7 January but rising motions appear in the situation of 6 March in the same region. Sinking motions at the surface in both cases however are the result of orographic forcing.

Key words: Bora; Vertical structure of bora; Relative vorticity; Horizontal divergence; Vertical motions.

1. UVOD

Bura je jedan od najpoznatijih lokalnih vjetrova koji puše iz NE kvadranta duž jadranske obale. Uzroci i mehanizam bure su još uvijek nedovoljno poznati, zbog toga mnogi autori s različitih aspekata proučavaju taj fenomen.

Najopsežniji pregled bure je dan u radu Yoshino (1976) gdje je bura promatrana s klimatološkog, sinoptičkog i aerološkog aspekta te su prikazani i neki drugi lokalni vjetrovi sličnih karakteristika u raznim krajevima svijeta. Poznato je da se najjača bura pojavljuje na sjevernoj obali Jadrana pa većina autora opisuje situacije s burom na tom području (Makjanić, 1978, Jurčec, 1981).

Proučavanjem bure u Slovenskom primorju bavili su se Petkovšek i Paradiž (1976). Pokazali su da je najveća učestalost jake bure na tom području u Ajdovščini. U skladu sa Bernoullijevom jednadžbom za promjenu

kinetičke energije oni razlikuju dva osnovna tipa bure, „usporna“ i „gradijentna“ te njihove kombinacije.

Preliminarni rezultati prvih avionskih mjerenja na području sjevernog Jadrana u vrijeme ALPEX-SOP prikazani su u radu Smitha (1982). Analizirajući situaciju 15. 4. 1982 on je pretpostavio da bi se promatrana bura mogla objasniti hidrauličkom teorijom, ali u kasnijem radu (Smith 1984) napominje da hidraulička teorija ne mora biti relevantna za opći mehanizam bure.

U ovom radu bura će se promatrati na području sjevernog Jadrana, s ciljem da se prikažu neke glavne karakteristike bure pri tlu i ukaže na razlike polja strujanja, i na visini u dvije situacije 7. 1. i 6. 3. 1982. U ranijem radu (Razumović et al., 1984) uspoređena su polja vrtložnosti, divergencije i vertikalnih gibanja u situaciji od 6. 3. 1982. sa jakom burom 2. 12. 1983. Obje situacije su bile povezane sa izrazitom ciklonalnom aktivnošću u Sredozemlju, a promatrana polja su bila vrlo slična. Pokazat će se da se u promatranoj situaciji od 7. 1. 1982. ova polja bitno razlikuju.

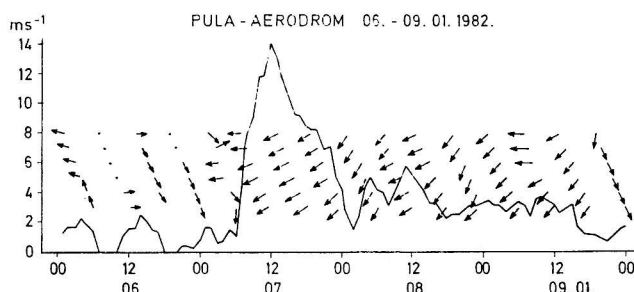
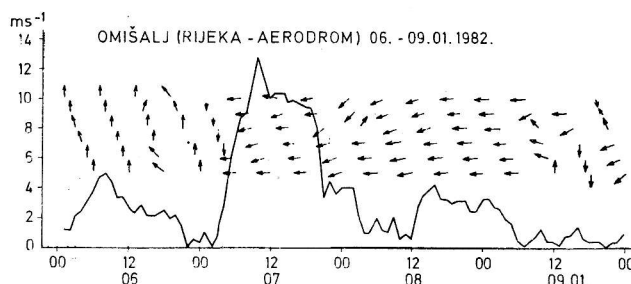
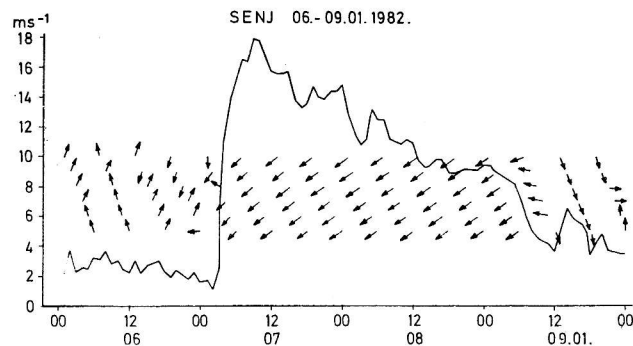
2. KARAKTERISTIKE BURE 7. SIJEČNJA I 6. OŽUJKA 1982.

Slika 1. prikazuje dnevne hodove srednjih satnih vrijednosti brzine i smjera vjetra u Senju, Omišlju na Krku (Rijeka – aerodrom) i na aerodromu Pula za 6 – 9. 1. 1982. Na ovim grafikonima se uočava nagli porast brzine čim vjetar skrene na smjer bure. U Senju i Puli je taj smjer ENE, dok u Omišlju prevladava E komponenta. Najjača je bura puhala 7. 1. kada je u Senju izmjeren maksimalni udar od 35.4 m/s, a u Omišlju 26.3 m/s. Toga dana je temperatura u Senju pala za 11.4°C/7 sati, dok se relativna vlaga na sve tri stanice smanjila ispod 30%. Pokazalo se da je bura najdugotrajnije puhala u Senju, do 9. 1. Prema tome, ovi grafikonci za vjetar kao i mezoanaliza na području sjevernog Jadrana (Brebrić, 1983) pokazali su da je bura puhala na cijelom tom području ali s najjačim intenzitetom i najdulje u Senju.

Radi usporedbe su promatrani isti takvi dnevni hodovi vjetra u situaciji 4 – 9. 3. (slika 2). Vjetar je skrenuo na buru između 2–4 sata SEV 5. 3. na svim promatranim stanicama i srednja satna brzina vjetra je također vrlo brzo porasla. Tako se u Senju brzina povećala za 10 ms⁻¹/7 sati, a u Omišlju za 11.8 m/s u istom razdoblju. U ovoj situaciji za vrijeme bure je zabilježena oborina koje je najviše izmjereno u Senju (17 mm od 5 – 7. 3). Maksimalni udari vjetra su registrirani 6. 3, međutim, najveće brzine vjetra su toga dana postignute na Krku. U Omišlju je u 9 navrata između 0 – 14 sati SEV izmjeren maksimalni udar od 35.0 m/s dok je na Titovom mostu, koji spaja otok Krk sa obalom, registriran toga dana u 13.50 sati SEV maksimalni udar od 51.5 m/s, što predstavlja apsolutni maksimum u 1982. godini. No, na ovoj stanici se koristi precizniji anemograf tipa VMZ-11 nego na ostalim stanicama pa te podatke ne možemo direktno uspoređivati zbog različitih instrumenata kojim se mjeri brzina vjetra (Vučetić, 1984). Prema tome, iako je poznato da najjača bura puše u Senju, u određenim vremenskim situacijama se pokazuje da udari vjetra mogu biti jači na nekom drugom području.

3. OPIS SINOPTIČKE SITUACIJE

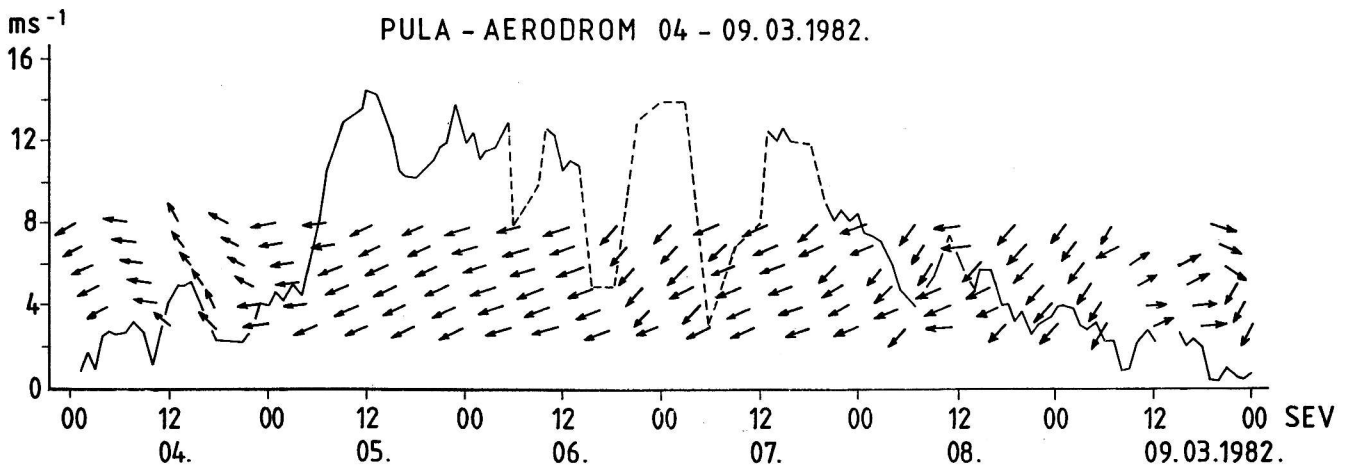
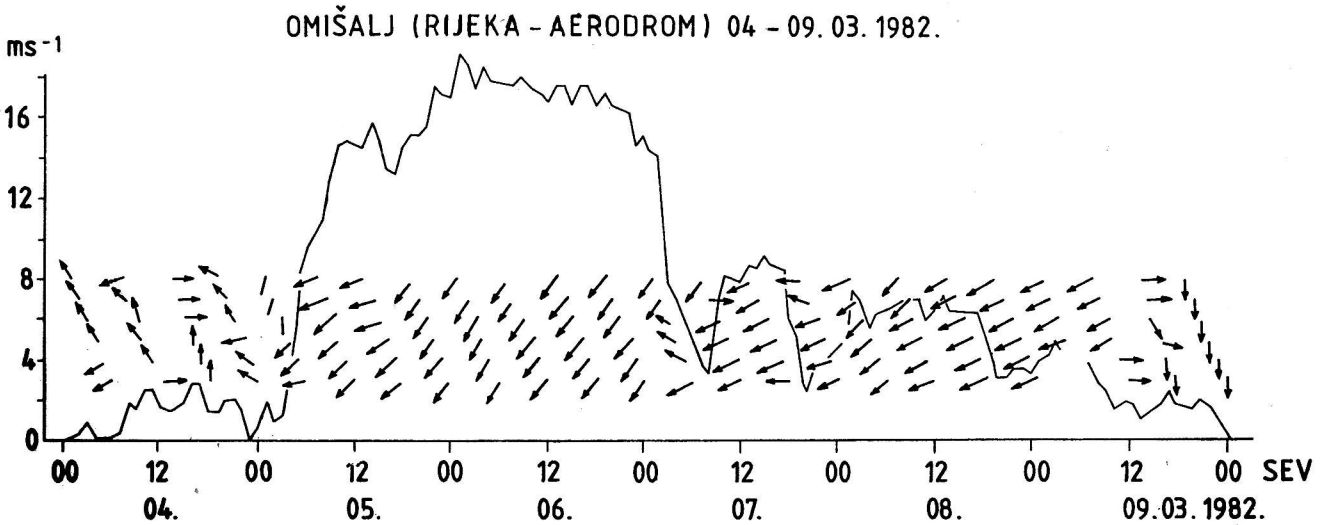
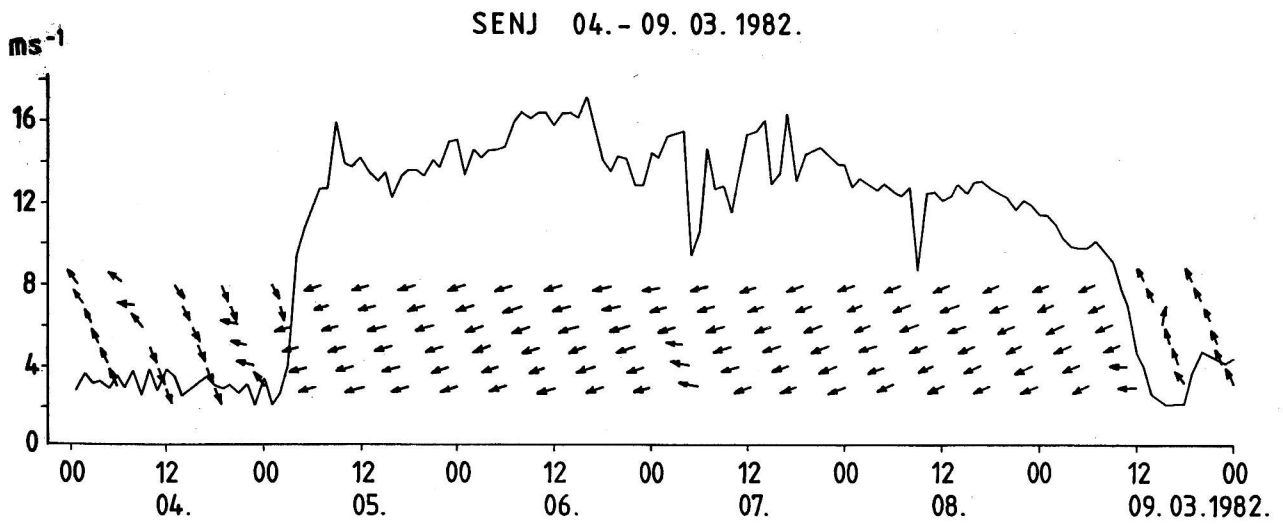
Različite prostorne raspodjele brzine vjetra za vrijeme bure ovise i o karakteristikama makro razmjera. Sinoptičke situacije u ova dva slučaja se bitno razlikuju. Maksimalnoj buri 6. 3. prethodila je fronta povezana sa ciklogenezom u Genovskom zaljevu i izrazita ciklonalna aktivnost u zapadnom Sredozemlju (slika 3). Anticiklona pri tlu je imala centar južno od Skandinavije. Na visini iznad Ligurskog mora 5. 3. se nalazila visinska dolina velike amplitude što je slijedeći dan omogućilo odsijecanje visinske ciklone (cut-off).



Sl. 1. Dnevni hodovi srednjih satnih vrijednosti brzine i smjera vjetra za Senj, Omišalj i Pulu-aerodrom od 6–9. 1. 1982.

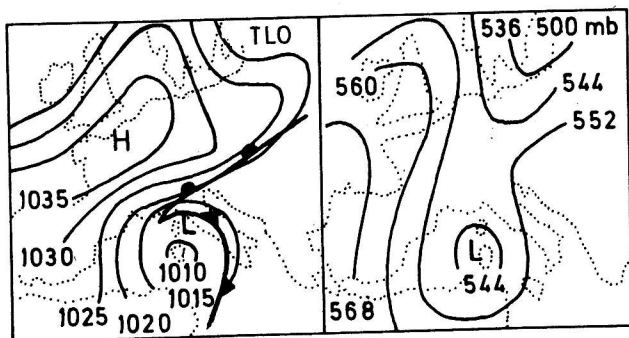
Fig. 1. Daily courses of mean hourly values wind speed and direction for Senj, Omišalj and the Pula-airport 6–9 January 1982

Za razliku od toga 7. 1. je u noći naše krajeve zahvatila hladna fronta povezana sa ciklonom iznad SSSR-a i tokom dana se vrlo brzo kretala prema jugu. Istovremeno je nad zapadnom Evropom ojačala anticiklona pa se na prizemnoj karti (slika 4) uočava vrlo jaki meridionalni gradijent tlaka nad našim krajevima i području Alpa. To pokazuje da je hladan zrak prodro istočno od Alpa, ali se izvjesna količina još zadržala u zaleđu alpskog masiva. Na visini se primjećuje vrlo jaka mlazna struja, a središte visinske ciklone se nalazi sjeverno od naših krajeva. Posljedice ovog prodora vrlo hladnog zraka u kasnijem razdoblju detaljno su prikazane u radu Brebrić (1983 b).



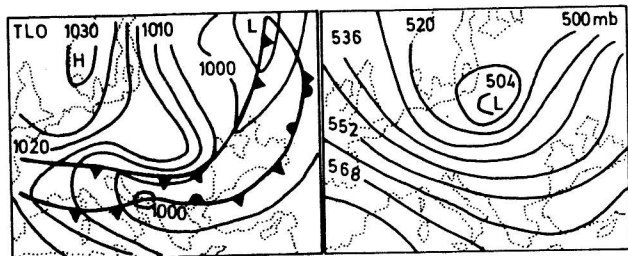
Sl. 2. Isto kao na slici 1. samo za razdoblje od 4-9. 3. 1982. Crtkana linija na grafikonu za Pulu-aerodrom prikazuje brzine vjetra svaka 3 sata prema radiosondažnim podacima pri tlu.

Fig. 2. Same as Fig. 1 except for the period 4-9 March 1982. Dashed lines on the graph of the Pula-airport indicate wind speed for every 3 hours according to radiosounding data at the surface



Sl. 3. Prizemna sinoptička situacija za 6. 3. 1982. u 00 sati GMT (lijevo) i AT 500 mb u 00 sati GMT istog dana (desno).

Fig. 3. The synoptic situation on 6 March 1982 at 00 GMT (left) and AT 500 mb at GMT on the same day (right)

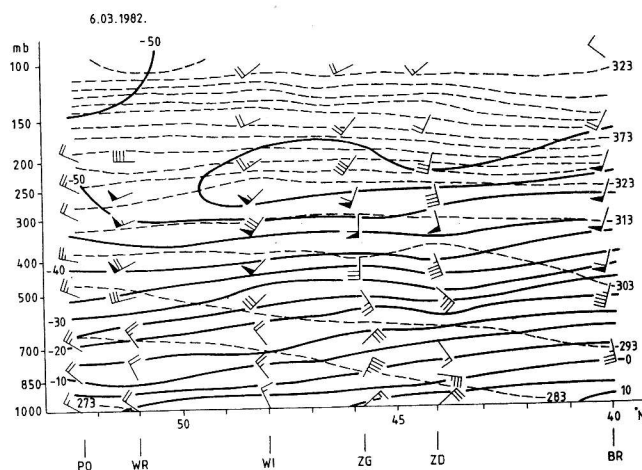
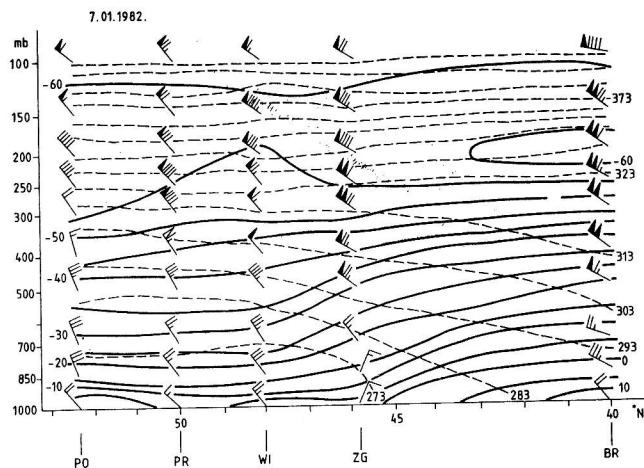


Sl. 4. Prizemna sinoptička situacija za 7. 1. 1982 u 06 sati GMT (lijevo) i AT 500 mb u 00 sati GMT istog dana (desno)

Fig. 4. The synoptic situation on 7 January 1982 at 06 GMT (left) and AT 500 mb at 00 GMT on the same day (right)

4. VERTIKALNA STRUKTURA ATMOSFERE

Opis sinoptičke situacije je nadopunjen prostornim vertikalnim presjecima duž 16°E meridijana za 7. 1. u 12 sati GMT i 6. 3. u 00 sati GMT (slika 5). U siječanjskoj situaciji je uočljivo vrlo jako NW visinsko strujanje iznad srednje Evrope i južne Italije, a brzina vjetra postiže maksimum iznad Zagreba od 64.8 m/s na 289 mb. Uz mlaznu struju su vezana jaka smicanja vjetra, a strmi nagib izentropa prema jugu ukazuje na jako baroklinu atmosferu nad našim krajevima. Zona pojačanih horizontalnih gradijenata temperature je oko 45°N geografske širine pa se na tom mjestu nalazi frontalna zona koju pratimo i na izentropskim plohama. Slijedećih 12 sati hladna fronta prodire do južne Italije i uzrokuje zahlađenje i u tim područjima. Vjetar iznad Zagreba se pojačao i 8. 1. u 00 sati GMT zabilježen je maksimum od 78.2 m/s na 297 mb.



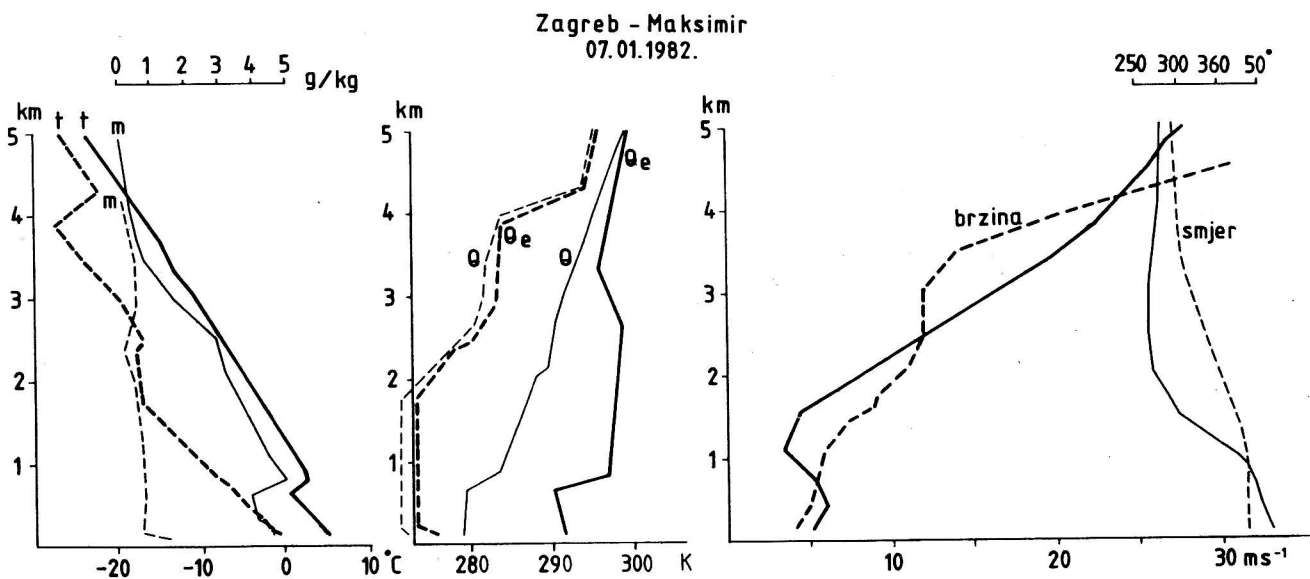
Sl. 5. Prostorni vertikalni presjek duž 16°E meridijana (Poznan-Wroclaw-Prag-Beč-Zagreb-Zadar-Brindisi) za 7. 1. 1982. u 12 sati GMT (lijevo) i 6. 3. 1982. u 00 sati GMT (desno). Vjetar je u čvorovima, pune linije su izoterme (°C), a crtkane izentropse (K)

Fig. 5. Spatial cross-section along the meridian of 16°E (Poznan-Wroclaw-Prague-Vienna-Zagreb-Zadar-Brindisi) for 7 January 1982 at 12 GMT (left) and 6 March 1982 at 00 GMT (right). Winds are given in knots, solid lines are isotherms (°C) and dashed lines isentropes (K)

Za razliku od siječanjske situacije u ožujku je na visini iznad 500 mb prevladavalo strujanje iz južnog kvadranta, a brzine vjetra su bile znatno manje. Maksimalna brzina od 38 m/s je registrirana na 300 mb iznad Beča. Blaži nagib izoterma i izentropa u donjoj troposferi nad našim područjem ukazuje na manju baroklinost atmosfere nego u siječnju. Prema tome analiza vertikalne strukture atmosfere je pokazala da postoje bitne razlike u poljima vjetra i temperature u makrorazmjerima za ove dvije situacije.

Osim toga, 7. 1. su se u donjoj troposferi zbivale značajne vremenske promjene temperature i vlage što možemo uočiti na vertikalnim profilima osnovnih meteoroloških elemenata za Zagreb – Maksimir u 00 i 12 sati GMT (slika 6). Pad temperature toga dana bio je praćen naglim padom vlage, izraženo pomoću omjera miješanja m , od prosječno 4 g/kg na 0.8 g/kg za 12 sati u sloju do 1 km. S obzirom da je promjenu temperature pratila i nagla promjena vlage, to se naročito odrazilo u kolebanjima ekvivalentne potencijalne temperature Θ_e .

Iznad sloja bure se u 12 sati GMT uočavaju dva stabilna sloja. U prvom sloju (1750 – 3000 m) je potencijalna temperatura porasla za 10.2°C, a u slijedećem (3932 – 4300 m) za 9.8°C. Međutim, drugi sloj je manje debljine pa je i stabilnost, izražena Brunt-Väisäläovom frekvencijom $N^2 = \frac{g}{\Theta} \frac{\partial \Theta}{\partial z}$ prikazano u tabeli 1, bila veća. Zbog različitog smicanja vjetra u pojedinim slojevima, Richardsonov broj $R_i = N^2 / \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2$ se bitno



Sl. 6. Vertikalni profili temperature (t u °C), potencijalne temperature (Θ u K), ekvivalentne potencijalne temperature (Θ_e u K), omjera miješanja (m u g/kg), brzine vjetra (m/s) i smjera vjetra za Zagreb-Maksimir. Punom linijom su prikazani profili u 00 sati GMT, a crtkanom u 12 sati GMT za 7. 1. 1982.

Fig. 6. Vertical profiles of temperature (t in °C), potential temperature (Θ in K), equivalent potential temperature (Θ_e in K), mixing ratio (m in g/kg), wind speed (m/s) and direction for Zagreb-Maksimir. Solid lines indicate profiles at 00 GMT and dashed lines at 12 GMT for 7 January 1982

U 00 sati GMT vjetar je pokazivao slabo izražen maksimum od 6.1 m/s neposredno ispod izraženog sloja inverzije (650 – 825 m). U tom sloju temperatura je porasla za 2.8°C, a potencijalna temperatura Θ za 3.9°C. Iznad sloja bure (1100 m), koji je definiran slojem u kojem puše vjetar iz smjera 0 – 90° isto kao i kod Yoshina (1976), vjetar je vrlo brzo skrenuo na NW smjer.

Stratifikacija donje stratosfere se promijenila tokom slijedećih 12 sati. Temperatura se kontinuirano smanjivala s visinom, do 1750 m što je ujedno i gornja granica sloja bure, od -0.4°C do -1.7°C. Potencijalna i ekvivalentna potencijalna temperatura, nakon naglog pada u prvih 100 m, ostaju konstantne. Na visini oko 4 km se uočava izrazita temperaturna inverzija jer je temperatura u tom sloju porasla za 5.2°C. Sloj bure u 12 sati GMT bio je deblji nego u prethodnom terminu. Na gornjoj granici sloja bure registriran je maksimalni vjetar od 9 m/s a nakon toga vjetar postepeno skreće na NW smjer.

Tabela 1. Brunt-Väisälä frekvencija N^2 (10^{-4} s^{-2}) i Richardsonov broj R_i iznad Zagreb – Maksimira za 7. 1. 1982. u 12 sati GMT i 6. 3. 1982. u 00 sati GMT.

Table 1. The Brunt-Väisälä frequency N^2 (10^{-4} s^{-2}) and the Richardson number R_i over Zagreb – Maksimir for 7 January 1982 at 12 GMT and 6 March 1982 at 00 GMT.

Datum	Sloj [m]	$\Delta\Theta$ [°C]	N^2 [10^{-4} s^{-2}]	R_i
7. 1. 1982.	228–1750	0.2	0.04	8.8
	1750–3000	10.2	2.88	61.3
	3000–3932	1.8	0.67	0.8
	3932–4300	9.8	9.02	2.5
6. 3. 1982	128–2500	5.7	0.84	5.5
	2500–3807	10.6	2.54	19.2
	3807–5000	4.8	1.33	13.1

mijenja (tabela 1). Najveću vrijednost R_i ima za prvi stabilni sloj gdje je smicanje vjetra slabo, a iznad toga sloja jako smicanje vjetra uzrokuje i jaču turbulenciju. U samom sloju bure atmosfera je gotovo neutralno stratificirana, a smicanje vjetra je malo.

U ožujskoj situaciji se raspolagalo sa dodatnim radiosondažnim mjerenjima u Puli za vrijeme ALPEX-SOP, pa je za 6. 3. 1982. u 00 sati GMT bilo interesantije promatrati prostorne vertikalne promjene pojedinih meteoroloških elemenata između navjetrinske i zavjetrinske strane. Detaljni opis ove situacije s karakteristikama bure u navjetrini dan je u radovima Jurčec (1984) i Koračin (1984).

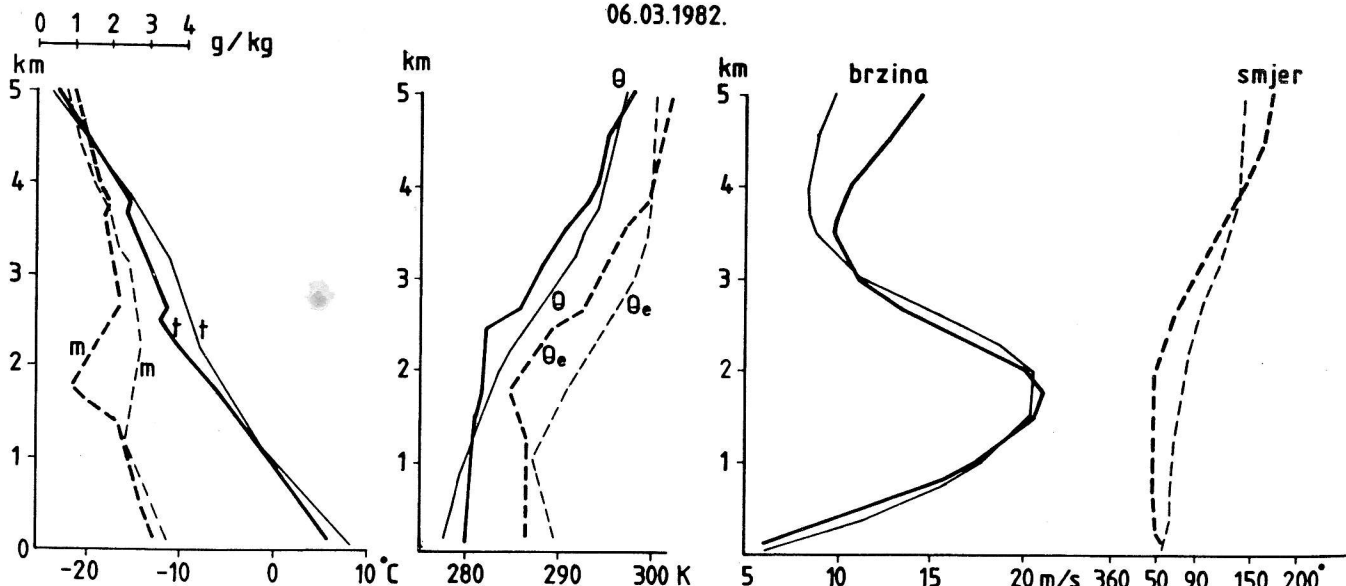
Na slici 7. se uočava u sloju bure, debljine 2.5 – 3 km, izraziti maksimum brzine iznad Zagreba i Pule koji je iznosio 21.1 m/s, odnosno 20.5 m/s, a iznad njega je vjetar naglo oslabio. Ponovo povećanje brzine vjetra i njegovo skretanje na SE smjer pojavljuje se iznad sloja bure. Istovremeno se temperatura zraka kontinuirano smanjivala s visinom do 2.5 km na obje stanice, a zatim

ukazuje na jaču turbulenciju. Međutim, ako bi R_i izračunali u sloju 128 – 1771 m, tj. do visine maksimalnog NE vjetra, onda bi on iznosio 1.1 i bio bi znatno manji nego u cijelom sloju bure. To je zbog različitog smicanja vjetra u ta dva sloja jer se vjetar od tla do 1771 m pojačao za 15.1 m/s (slika 7) pa je i smicanje vjetra u donjem sloju bilo znatno jače, a time i izraženija turbulencija.

Prema tome, bitna razlika u strukturi donje troposfere u navjetrini u ova dva slučaja izražava se u postojanju dva stabilna sloja u siječnju i samo jednog u ožujku. U ovoj posljednjoj situaciji turbulencija je jača u samom sloju bure ispod stabilnog sloja dok je u siječnjaškoj situaciji ona upravo jača iznad prvog stabilnog sloja.

$$\text{Izračunavanje Froudovog broja } F = \frac{U^2}{g' H}, g' = \frac{\Delta \Theta}{\Theta} g \text{ na način kao u radu Smitha (1984) dalo je}$$

Zagreb – Maksimir i Pula 06.03.1982.



Sl. 7. Isto kao na slici 6. samo za 6. 3. 1982. u 00 sati GMT. Debelom linijom su prikazani vertikalni profili za Zagreb – Maksimir, a tankom linijom za Pula.

Fig. 7. Same as Fig. 6 except for 6 March 1982 at 00 GMT. Heavy lines indicate vertical profiles for Zagreb – Maksimir and thin lines for Pula.

se iznad Zagreba primjećuje slab porast temperature od 0.8°C u sloju debljine 160 m. Vertikalna raspodjela vlage pokazuje neposredno ispod sloja inverzije u Zagrebu vrijednost omjera miješanja 1 – 2 g/kg dok u Puli oko 3 g/kg, što znači da je donja troposfera u zavjetrini bila vlažnija.

Stabilni sloj zraka (2500 – 3807 m) je izraženiji u navjetrini nego zavjetrini, a zbog slabog smicanja vjetra u tom sloju turbulencija je manja (tabela 1). U samom sloju bure ispod inverzije R_i je minimalan što nam

vrijednost 0.65 u 00 sati GMT za 6. 3, a 12 sati kasnije 0.74, što se nešto razlikuje od vrijednosti 0.62 koju je dobio Smith za isti termin. Do te razlike je došlo zbog toga što mi raspoložemo s detaljnijim podacima radiosondažnih mjerenja pa se preciznije mogla odrediti visina baze inverzije. Froudov broj je, u sloju do prvog stabilnog sloja za 7. 1. u 12 sati GMT, 1.7 pa je veća vjerojatnost za mehanizam hidrauličkog skoka ($F < 1$) u ožujskoj situaciji, iako se ovdje radi o kombinaciji više mehanizama.

4. ANALIZA POLJA VRTLOŽNOSTI, DIVERGENCIJE I VERTIKALNE BRZINE

Za mrežu točaka 8 x 8 udaljenosti 100 km, koja pokriva područje Jugoslavije i Jadrana (slika 8), računata su polja relativne vrtložnosti

$$\zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad (4.1)$$

horizontalne divergencije

$$D = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = - \frac{\partial \omega}{\partial p} \quad \omega \equiv \frac{dp}{dt} \quad (4.2)$$

i vertikalne brzine iz relacije (Holton, 1972)

$$w = -(\rho g)^{-1} \omega \quad (4.3)$$

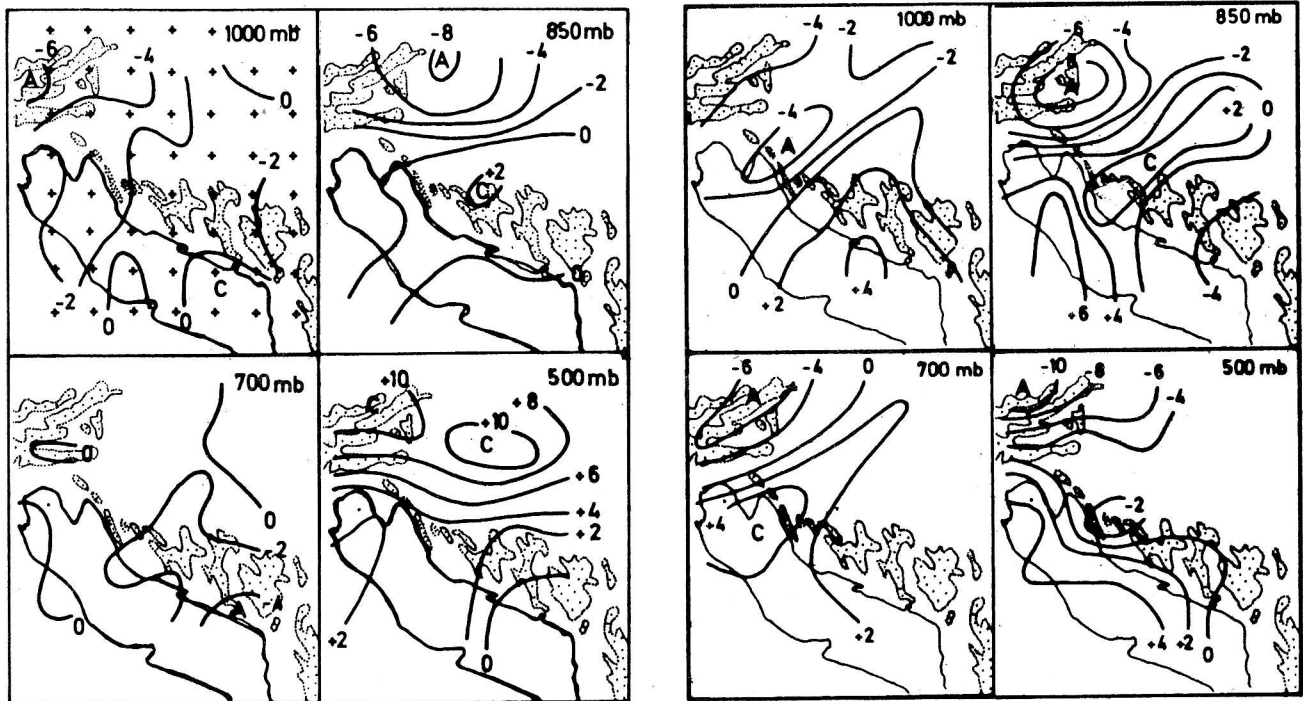
$$\omega_n = \omega_{n-1} + \bar{D} \Delta p \quad n = 1, 2, 3 \quad (4.4)$$

gdje su u i v horizontalne komponente vjetra, a w vertikalna komponenta. Polja u i v komponente, te ζ i D su određene za četiri izobarna nivoa 1000, 850, 700 i 500 mb za 7. 1. u 12 sati GMT i 6. 3. u 00 sati GMT. ω je određen kao razlika srednjih vrijednosti divergencije D u pojedinim izobarnim slojevima (1000/850, 850/700, 700/500) što uz $\omega_0 = 0$, označuje vertikalne brzine na gornjim izobarnim slojevima.

Analiza relativne vrtložnosti pri tlu u siječanjskoj situaciji pokazuje prevladavanje anticiklonalne vrtložnosti koja jača u zapadnom dijelu na 850 mb plohi (slika 8). To nam ukazuje na obilaženje struje oko planinske prepreke Alpa što dovodi do NE prodora hladnog zraka (Bajić, 1984) i bure na sjevernom Jadranu. Idući s visinom polje vrtložnosti se mijenja. Na 500 mb plohi prevladava ciklonalna vrtložnost na cijelom promatranom području s najvećim intenzitetom u južnoj Austriji i Mađarskoj.

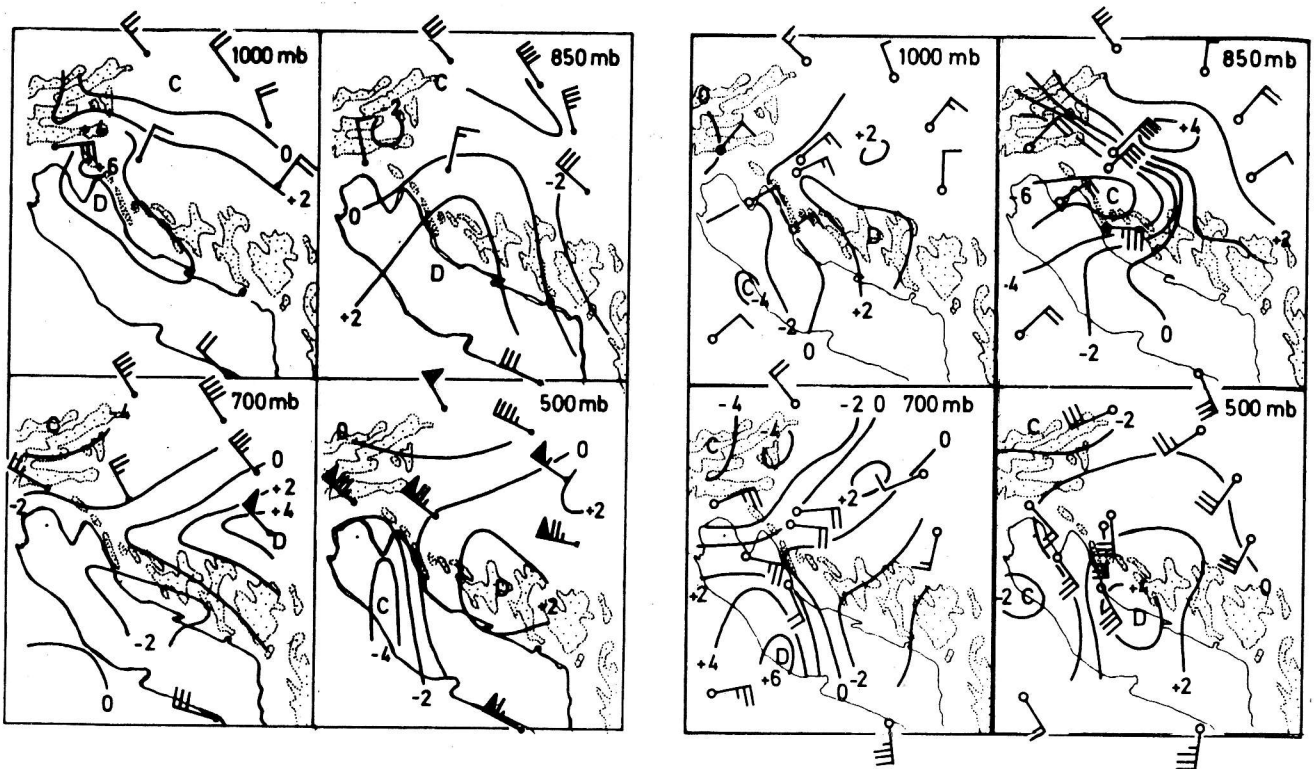
Polje relativne vrtložnosti 6. 3. pokazuje pri tlu izraženu ciklonalnu vrtložnost nad južnim, a anticiklonalnu nad sjevernim Jadranom. Za razliku od siječanjske situacije intenzitet anticiklonalne vrtložnosti jača s visinom iznad 850 mb dok se slabija ciklonalna vrtložnost zadržava samo na području Jadrana i izraženija je na 700 mb na sjevernom dijelu. To je vidljivo i iz polja vjetra na slici 9. superponiranog na razdiobu divergencije na istim izobarnim plohama.

Najveća razlika između promatranih situacija je u polju horizontalne divergencije koja uzrokuje i različitu raspodjelu vertikalne brzine. U siječnju je karakteristična vrlo jaka divergencija pri tlu na području sjevernog Jadrana i na 700 mb plohi nad istočnim dijelom Jugoslavije. Za razliku od ove raspodjele u ožujku je centar divergencije nad Jadranom na visini, dok je u donjoj troposferi najizraženija konvergencija iznad sjevernog Jadrana.



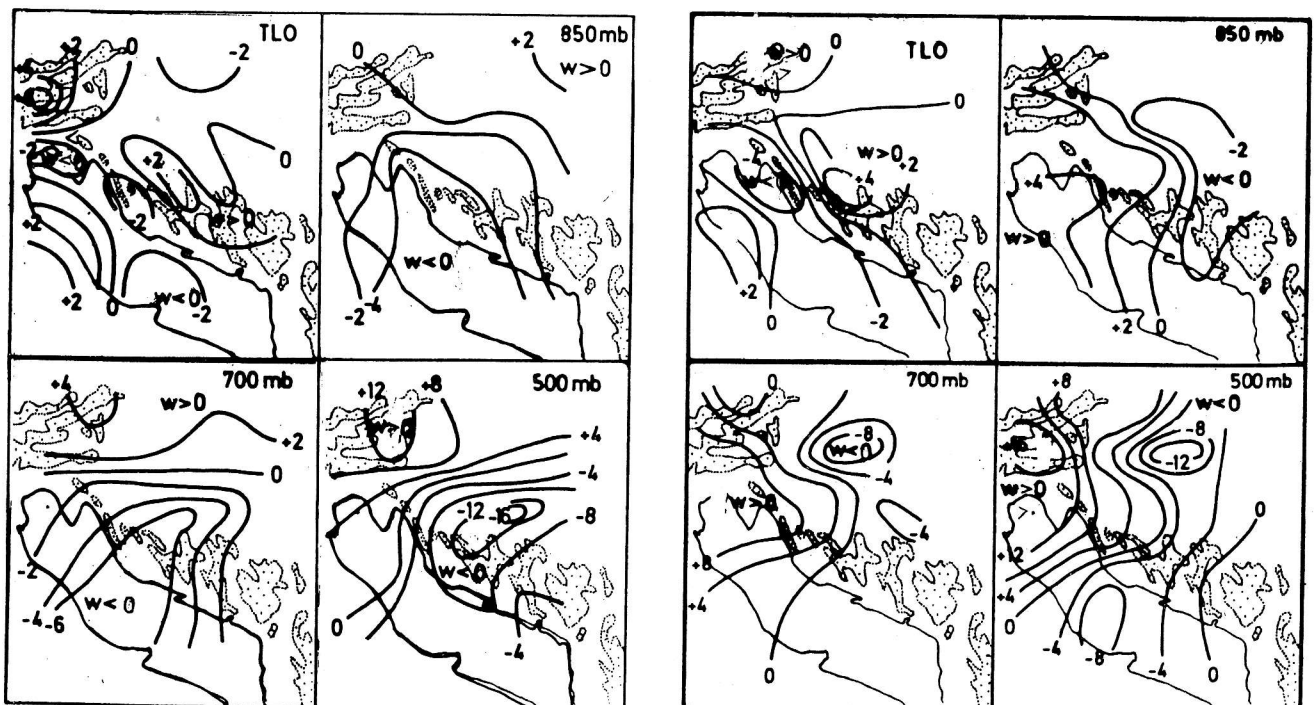
Sl. 8. Polje relativne vrtložnosti ($10^{-5} s^{-1}$) za 7. 1. 1982. u 12 sati GMT sa mrežom točaka udaljenosti 100 km prikazano na karti 1000 mb (lijevo) i za 6. 3. 1982. u 00 sati GMT (desno). A označuje anticiklonalnu, a C ciklonalnu vrtložnost.

Fig. 8. Relative vorticity field ($10^{-5} s^{-1}$) for 7 January 1982 at 12 GMT with grid distance 100 km, indicated on 1000 mb map (left) and 6 March 1982 at 00 GMT (right). A is anticyclonic and C is cyclonic vorticity.



Sl. 9. Podaci vjetrova u čvorovima i polje horizontalne divergencije (10^{-5} s^{-1}) za 7. 1. 1982. u 12 sati GMT (lijevo) i 6. 3. 1982. u 00 sati GMT (desno). D označava divergenciju, a C konvergenciju.

Fig. 9. Wind data in knots and horizontal divergence field (10^{-5} s^{-1}) for 7 January 1982 at 12 GMT (left) and 6 March 1982 at 00 GMT (right). D is divergence and C is convergence.



Sl. 10. Polje vertikalne brzine (cm/s) za 7. 1. 1982. u 12 sati GMT (lijevo) i 6. 3. 1982. u 00 sati GMT (desno). $w > 0$ označava uzlaznu struju.

Fig. 10. Vertical motions (cm/s) for 7 January 1982 at 12 GMT (left) and 6 March 1982 at 00 GMT (right).

Polje vertikalnih brzina prema relaciji (4.3) pokazuje za 7. 1. u donjoj troposferi izrazitu silaznu komponentu gibanja sa maksimalnim vrijednostima na području srednjeg Jadrana. Na 500 mb područje maksimalne silazne struje se pomaklo prema Bosni (maksimum od -16.0 cm/s). Najjača uzlazna struja je na 500 mb plohi južno od Beča s maksimalnom vrijednosti od 13.3 cm/s, a na nižim nivoima je ta komponenta gibanja slabije izražena.

Vertikalne brzine pri tlu su računane iz prizemnog polja vjetra i topografije relacijom

$$w = u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} \quad (4.5)$$

Slika 10. pokazuje veću sličnost u raspodjeli orografski uvjetovanih vertikalnih gibanja u ove dvije situacije nego na višim nivoima. Obje razdiobe vertikalne brzine pri tlu pokazuju uzlazna gibanja u navjetrini na području Bosne i silazna gibanja duž obale. Ova silazna struja je izraženija 6. 3. na sjevernom Jadranu. Usporedba vertikalnih brzina na višim nivoima s ožujskom situacijom ukazuje na uzlazna gibanja u zapadnom dijelu koja s visinom jačaju do 16 cm/s. Istovremeno silazna komponenta brzine na istočnom dijelu ima maksimum nad Slavonijom i južnom Mađarskom.

Iako je prikazana metoda računanja vertikalnih brzina jednostavna, čini se da ona ipak daje prihvatljive rezultate i, barem u kvalitativnom smislu, može korisno poslužiti budućim analizama trodimenzionalnog polja strujanja za vrijeme bure na Jadranu.

5. ZAKLJUČAK

Analiza prizemnog polja vjetra i strujanja na visini pokazala je neke značajne razlike u polju temperature i vjetra u promatranim sinoptičkim situacijama od 7. 1. 1982. i 6. 3. 1982. U prvom slučaju bure naši krajevi su se nalazili pod izraženim utjecajem zapadnoevropske anticiklone, a na visini je prevladavalo jako NW strujanje. U drugom slučaju bura je bila povezana s jakim ciklonalnom aktivnošću u Sredozemlju i znatno slabijim SE visinskim vjetrom nego u siječnju.

U obje situacije uz buru se javlja vrlo nagli porast brzine vjetra na tri promatrane stanice, ali se u Senju dulje zadržava, naročito u ožujskoj situaciji. Međtim, u toj situaciji je maksimalna brzina vjetra veća u Omišlju nego u Senju.

Obje situacije pokazuju karakteristični stabilni sloj s nešto nižom bazom i približno neutralnom stratifikacijom ispod njega u siječnju. Međtim, u toj situaciji nalazimo drugi izraženiji stabilni sloj povezan s jakim temperaturnom inverzijom i pojačanom turbulencijom. Ožujaska situacija ima najveću turbulenciju u sloju bure ispod stabilnog sloja.

Bitni rezultat analize polja vrtložnosti je anticiklonalna relativna vrtložnost u zapadnom dijelu promatranog područja koja ukazuje na obilaženje struje zraka

istočno od Alpa. To je povezano s poznatim NE prodorom hladnog zraka uz pojavu bure na Jadranu.

Analiza polja divergencije ukazuje na prevladavajuću divergentnu komponentu u siječanjskoj situaciji s NW vjetrom iznad sloja bure, dok je u ožujku nad zapadnim dijelom konvergencija naročito izražena na 850 mb plohi iznad sjevernog Jadrana.

Vertikalna komponenta gibanja pri tlu uvjetovana orografijom daje uzlaznu struju u navjetrini, a silaznu duž obale u obje situacije. Iznad prizemnog sloja u siječnju prevladava silazna komponenta dok je u ožujku nad zapadnim područjem karakteristična uzlazna struja. S obzirom da je ova posljednja raspodjela vrlo slična raspodjeli w za vrijeme jake bure 2. 12. 1983, očito je da na ove razdiobe bitno utječe strujno polje u makrorazmjerima i promjena vjetra s visinom koju diktiraju pojedine sinoptičke situacije.

Ova analiza pokazuje da unatoč tome što bura bitno ovisi o stanju atmosfere u navjetrini, pa se svrstava u fenomene mezorazmjera, intenzitet bure i raspodjela smjera i brzine vjetra ovisi o lokalnim efektima. S druge strane, stanje atmosfere u mezorazmjerima bitno podliježe vremensko-prostornim promjenama cirkulacije u makrorazmjerima. To znači da se za objašnjenje mehanizma bure moraju uzeti u obzir atmosferski razmjeri i njihove interakcije.

LITERATURA

- BAJIĆ, A., 1984: A case study of cold air outbreak in Zagreb during ALPEX SOP, 18 ICAM, Opatija, 25–29 September 1984, 35–38.
- BREBRIĆ, V., 1983a: Bura na sjevernom Jadranu u ALPEX godini, Zbornik radova ALPEX-MEDALPEX, Split, 7–8. lipanj 1983.
- BREBRIĆ, V., 1983b: Ledena kiša i poledica na području Hrvatske u siječnju 1982. Zbornik radova SAREN, Beograd, 28–30. rujan 1983, 289–298.
- HOLTON, J. R., 1972: An introduction to dynamic meteorology, 319 pp.
- JURČEC, V., 1966: Orographically and frictionally induced vertical motions. III Conference for Carpathian Meteor. Belgrade, 27–30 May 1965, 379–386.
- JURČEC, V., 1981: On mesoscale characteristics of bora conditions in Yugoslavia, PAGEOPH, 119, 640–657.
- JURČEC, V., 1984: Strong bora case in Zadar and upstream bora layer characteristics, 18 ICAM, Opatija, 25–29 September 1984, 105–108.
- KORAČIN, D., 1984: Parameters of bora flow, 18 ICAM, Opatija, 25–29 September 1984, 109–111.
- MAKJANIĆ, B., 1978: Bura, Jugo, Etezija, SHMZ, Beograd, 73 str.
- PETKOVŠEK, Z., and B. PARADIŽ, 1976: Bora in the Slovenian Coastal Region, In Local Wind Bora (ed Yoshino), 135–144.
- RAZUMOVIĆ, V., D. LETINIĆ-SABLJAK, and V. VUČETIĆ, 1984: A case study of strong Adriatic bora, 18 ICAM, Opatija, 25–29 September 1984, 123–126.
- SMITH, R. B., 1982: Observations of the Yugoslavian bora: Preliminary results, WMO/ICSU Geneva, GARP-ALPEX, No 7, 187–201.
- SMITH, R. B., 1984: Aerial observations of the Yugoslavian bora, 18 ICAM, Opatija, 25–29 September 1984, 127–129.
- VUČETIĆ, V., 1984: On the time and space variations of the northern Adriatic bora, 18 ICAM, Opatija, 15–29 September 1984, 134–137.
- YOSHINO, M. M., 1976: Local Wind Bora. Univ. Tokyo Press, 289 pp.

Zahvala

Ovaj rad je sufinancirala Rep. zajednica za znanstveni rad SRH (SIZ III – projekt 43).

SUMMARY

This paper presents some basic characteristics of bora wind and the differences in the upper level wind structure in two case studies on 7 January and 6 March in 1982. It is shown that the onset of bora is characterised by an increase of wind speed at all considered stations, but its decay is not simultaneous, with the longest duration in Senj. Senj's bora is usually considered the strongest one along the northern Adriatic, but the bora cases associated with strong cyclonic activity in the Mediterranean may show stronger gusts at some other places. Such an example is shown on 6 March 1982 when the strongest bora of 51.5 m/s is registered on Tito's Bridge that connects the island of Krk with the coast.

In the case of 7 January the prevailing upper level wind was NW with a maximum speed of 64.8 m/s at 289 mbar at Zagreb, whereas on 6 March the SE upper level wind, associated with the cyclone in western Mediterranean was much weaker (Fig. 3–5).

The upstream bora condition is characterized in both cases by a stable layer (Figs. 6 and 7), but in the January case at about 4 km we find another even more expressed stable layer with a strong temperature inversion. In this layer we also find

a strong wind shear which results in a small Richardson number (Table 1), whereas in the case of the bora in March the turbulence is stronger in the bora layer itself where we find the expressed wind speed maximum.

An analysis of relative vorticity shows the anticyclonic vorticity in the lower troposphere in the western part of the considered area (Fig. 8) which indicates an airstream around the Alps with a cold air outbreak from the NE. The intensity of the anticyclonic vorticity in the January case is weakening with the height, opposite to the March case.

The largest difference in the considered cases appears in the divergence field (Fig. 9) which also results in the difference in vertical velocity distribution. In January we find the prevailing divergence above the Adriatic up to the 700 mbar, with increasing convergence above it. In the contrary the convergence is especially expressed at the 850 mbar surface above the northern Adriatic in the March case. Such a distribution of divergence causes sinking motions in January in the western part of the area above the surface layer and rising in March. However the orographically induced vertical motion at the surface, calculated from (4.5), is similar in both cases. At the upstream side over Bosnia we find ascents and descents in the lee side which are more expressed over the northern Adriatic in the March case.

This analysis therefore shows that in spite of the bora's dependence on the upstream atmospheric condition, which makes it a mesoscale, the intensity of bora and its direction strongly depend on local effects. From the other side, the atmospheric condition undergoes spatial and temporal variations of circulation changes on the macro-scale, meaning that the explanation of bora mechanisms must take into consideration the atmospheric processes of a variety of scales as well as their interaction.