

STRUKTURA DONJE TROPOSFERE NA OSNOVI OPAŽANJA U ZAGREBU I PULI U ALPEX SOP. I DIO: SREDNJI PROFILI TEMPERATURE I VJETRA

Observational Study of Low Tropospheric Structure in Zagreb and Pula during ALPEX SOP. Part I: Mean Temperature and Wind Profiles

Vesna Jurčec

Republički hidrometeorološki zavod SRH, Zagreb

Primljeno 19. svibnja 1986, u konačnom obliku 10. rujna 1986.

Sažetak: Prikazani su srednji mjesečni vertikalni profili temperature i vjetra za ožujak i travanj 1982 u 6-satnim vremenskim intervalima i diskutiran je utjecaj mezoprocesa na području Alpa na lokalne fenomene. Pokazano je da je srednja visina do koje nalazimo strujanje oko Alpa u oba mjeseca 2 km, ali varira u toku dana i u ovisnosti o tipu sinoptičke situacije. Istaknute su razlike srednjih profila u ožujku s nestalnim stanjem atmosfere, u kojem zagrebački profil vjetra ukazuje na noćni maksimum brzine na visini od 2 km, i u travnju, s visokom stalnošću atmosfere, u kojem obe lokacije pokazuju tipične profile vjetra za situacije s burom na Jadranu. Vektorski srednjaci vjetra su u promatranom razdoblju male veličine s obzirom da su prevladavajući smjerovi vjetra oko alpske barijere uglavnom suprotnih smjerova (NE i SW) pa se u dugoročnom srednjaku pobijaju.

Ključne riječi: ALPEX SOP podaci, nestalnost atmosfere, bura, struktura donje troposfere, Zagreb, Pula.

Abstract: Mean monthly vertical temperature and wind profiles are shown for March and April 1982 in six-hourly intervals, and the influence of Alpine mesoscale processes on local scale phenomena is discussed. It is shown that the mean height up to which the flow around the Alps is found in both months is about 2 km, but it varies during the day as well as in dependence of a weather type. The differences in mean monthly profiles are stressed. March is characterized by a transient atmospheric state, in which Zagreb's wind profile indicates the nocturnal wind speed maximum at 2 km height; April has a higher steadiness of the large scale atmospheric state, in which both locations indicate wind profiles typical for the Adriatic bora cases. It is stressed that the local longterm wind vector's averages such as appeared in March are small quantities since the prevailing wind around the Alpine barrier are mainly of the opposite direction (NE and SW) and therefore cancel in the temporal mean.

Key words: ALPEX SOP data, transient atmospheric state, the bora vertical wind profile, low tropospheric structure, Zagreb, Pula.

1. UVOD

Jedan od glavnih ciljeva Alpskog eksperimenta ALPEX-a, bilo je utvrđivanje uvjeta pod kojima se zračna masa giba oko ili preko planinske prepreke. Zato se među najznačajnije i iznenađujuće rezultate dobivene avionskim mjerenjima iznad područja Alpa ubraja pojava izrazito nagle promjene brzine i smjera vjetra oko 3 km visine, koja bi približno odgovarala vrhovima Alpa. Ispod ove visine zračna struja uglavnom obilazi planinsku prepreku, dok iznad nje postoji relativno mali utjecaj orografije na sistem strujanja (WMO/ICSU, 1982; Pierrehumbert, 1984).

Pierrehumbert i Wyman (1985) su razvili teoriju prema kojoj je oštra granica strujanja iznad i ispod vrhova Alpa rezultat viskoznosti zraka i Coriolisove sile, ali teorija ne objašnjava ključnu pojavu – naglu promjenu smje-

ra vjetra za koju ovi autori pretpostavljaju da nastaje uslijed miješanja donjih slojeva atmosfere.

Poznato je (npr. Smith, 1979, 1982) da u planinskom području pored prizemnog trenja značajnu ulogu u dinamici gibanja ima planinski otpor tlaka. On se očituje u asimetričnoj raspodjeli tlaka u navjetrini i zavjetrini planine, koja se razlikuje od raspodjele tlaka pri stacionarnom strujanju.

Lin i Smith (1986) su poput mnogih drugih autora uočili da se pri mezoprocima termičkog ili mehaničkog porijekla u donjoj troposferi orografskog područja ne postiže pravo stacionarno stanje, pa je za objašnjenje ovih problema nužno razmatrati vremenski ovisne sisteme i nestacionarne modele.

Bannon (1985) je razvio jednostavni model za prikaz efekata nestacionarnog toka koji uvjetuje planinski otpor

uz pretpostavku da je strujanje oko, a ne preko planine. Ispitivanje povezanosti akceleracije i planinskog otpora pokazuje da vremenska promjenljivost toka može sama po sebi dovesti do asimetrije tlaka preko planine i time uzrokovati planinski otpor. Pri tome je značajno da je vremenski srednjak prognozirane akceleracije periodičkog incidentnog toka jednak nuli, što znači da otpor akceleracije nema direktni utjecaj na srednje strujanje u klimatološkom smislu. Međutim, u određenom momentu je otpor prisutan i djeluje na strujanje, a u realnoj atmosferi može utjecati i na daljnji razvoj sinoptičke situacije.

Hafner i Smith (1985) su izvršili detaljnu analizu planinskog otpora tlaka u cijelom razdoblju SOP ALPEX-a s vremenskom rezolucijom od 3 sata. Oni su računali horizontalni dvodimenzionalni vektor otpora na nekoliko horizontalnih i vertikalnih sektora Alpa do 3 km visine i usporedili vremenski niz ovih vektora s nizom uzastopnih promjena sinoptičkih situacija i fenomena kao što su fronte, ciklogeneza i pojava sjevernog i južnog föhna. Pokazalo se da epizode s toplom advekcijom, povezane sa S-föhnom, i zavjetrinske ciklogeneze, uz N-föhn, uzrokuju velike vektore otpora, ali su ovi vektori suprotnog smjera i u vremenskom srednjaku za SOP se gotovo ukiđaju.

U ovom radu nas interesiraju posljedice makrovremenskog stanja i orografskih efekata mezorazmjera na ponašanje lokalnog profila vjetera i njegovog dugoročnog srednjaka u sloju do 3 km visine. Lokalni efekti dakako više dolaze do izražaja u prizemnim slojevima, dok se najveći utjecaj mezoefekata može očekivati pri samom vrhu promatranog sloja, tj. pri vrhovima planina. Za razliku od Hafnera i Smitha koji su računali srednji vektor planinskog otpora za cijelo razdoblje SOP, u ovom radu se posebno ističu mjesečni srednjaci za ožujak i travanj. To nam omogućava da pokažemo razliku lokalne varijabilnosti vjetera u razdoblju koje je obilovalo epizodama visokih vrijednosti otpora tlaka (ožujak 1982) i u vrlo hladnom razdoblju (travanj 1982) za koji je karakteristična mnogo perzistentnija sinoptička situacija tipa bure.

Uz profile vjetera pratit ćemo i profile temperature. Nagla promjena strujanja pri vrhovima planina ima za posljedicu različitu advekciju temperature, a time se mijenja stabilnost mase uz mogućnost povećanja vertikalnog smicanja vjetera. Vertikalno smicanje smjera vjetera u vrlo stabilnoj atmosferi uvjetuje turbulentna gibanja (Mahrt, 1985), što je važan faktor za daljnju evoluciju profila vjetera. Jačanjem visinske inverzije temperature može doći i do odvajanja prizemnog i visinskog strujanja, dok u nestabilnoj (ili neutralnoj) atmosferi razvoj konvektivnih sistema u nižim slojevima bitno ovisi o vjetru na nivou planinskih vrhova (Banta, 1986).

Raspoloživi radiosondažni podaci za Zagreb i Pulu u SOP 6-satnim vremenskim intervalima daju uvid u dnevni hod temperature i vjetera u graničnom sloju atmosfere, kao nastavak prethodnih istraživanja ove problematike (Jurčec, 1985).

2. KARAKTERISTIKE ATMOSFERSKE CIRKULACIJE NA PODRUČJU EVROPE I NE ATLANTIKA U OŽUJKU I TRAVNJU 1982.

Atmosferska cirkulacija u SOP je znatno odstupala od normale u oba mjeseca (Jurčec, 1983).

Srednja mjesečna razdioba tlaka zraka u ožujku pokazivala je mnogo dublju islandsku ciklonu i viši tlak na području azorske anticiklone od normale. Povećani gradijent tlaka između ova dva centra odrazio se u jačem W – NW strujanju s Atlantika prema evropskom kopnu, što je imalo za posljedicu veće učestalosti ciklogeneze u zapadnom Sredozemlju od uobičajenih za to doba godine (Buzzi, 1984).

Analize planinskog otpora tlaka na području Alpa (Hafner i Smith, 1985) također su ukazale na veliku promjenljivost tipova sinoptičkih situacija u ožujku u suprotnosti s relativno mirnim razdobljem u travnju.

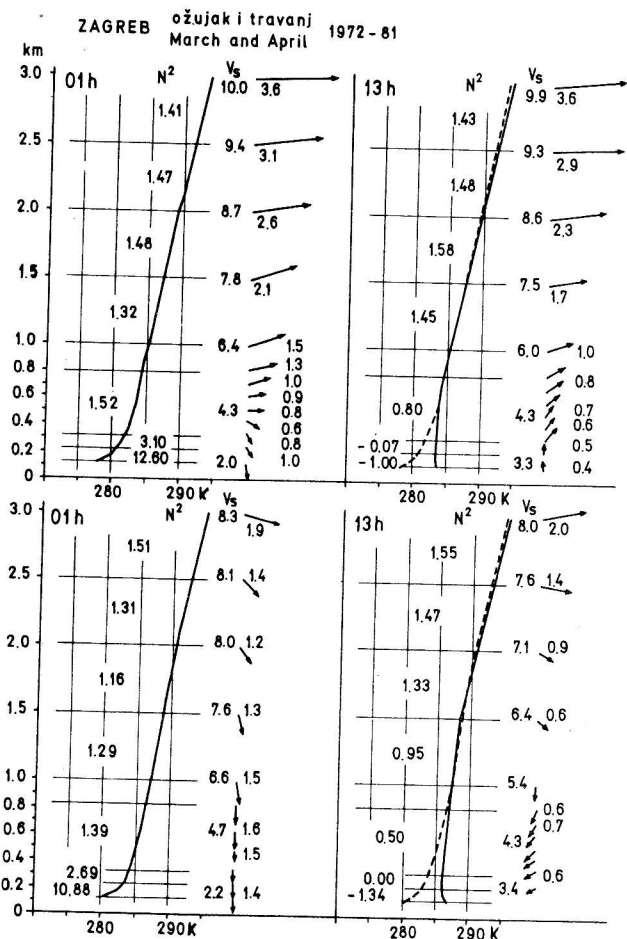
Uzrok mnogo stalnijem stanju atmosfere u travnju bilo je područje visokog tlaka nad Velikom Britanijom, koje je blokiralo direktne prolaze fronta s Atlantika u Sredozemlje, ali je duboka ciklona u sjevernoj Skandinaviji omogućila prodore vrlo hladnog zraka prema srednjoj i južnoj Evropi. To je uzrokovalo da je travanj 1982. u kontinentalnom dijelu Hrvatske imao najniže temperature u razdoblju 1951–1982. (Katušin i Juras, 1983).

3. ANOMALIJE VEKTORSKOG SREDNJAKA VJETRA I VERTIKALNE RAZDIOBE TEMPERATURE U ZAGREBU

Slika 1 prikazuje vertikalne profile temperature i vjetera za ožujak i travanj za Zagreb za razdoblje 1972–1981. (u daljnjem tekstu „normala“). Prema dugogodišnjem srednjaku ožujak je mjesec s većom perzistencijom određenih tipova sinoptičkih situacija nego travanj, što se očituje u većoj stalnosti (omjeru vektorskog i skalarnog srednjaka) vjetera iznad 1 km visine u normali ožujka i u malim dnevnim kolebanjima vektora vjetera iznad donjeg graničnog sloja. Travanj pokazuje veću stalnost vjetera noću do 1 km visine, u kojem se sjeverni vjetar obronka pojavljuje u dubljem sloju nego u ožujku, dok danji vektorski srednjak ima NE smjer.

Prema tome, pojava NE vjetera u donjem graničnom sloju u podnevnom terminu travnja 1982. (sl. 2 i 3) nije neočekivana pojava u tom mjesecu, ali je anomalna po velikoj stalnosti vjetera kao rezultat velike perzistencije sinoptičke situacije. Ova vertikalna raspodjela vjetera je tipična za situacije pri pojavi bure na Jadranu (Bajić, 1984).

Nasuprot tome, anomalni smjer vektorskog srednjaka u ožujku 1982. javlja se uz vrlo malu stalnost vjetera, što je posljedica nestalne makrovremenske situacije u tom mjesecu. Naročito je upadljiva razlika smjera vektorskog srednjaka u 01 h u odnosu na ostale termine ožujka u Zagrebu na slici 3, kao i isti termin u Puli (sl. 4). Zato ćemo pogledati što nam označuje ovaj srednjak u odnosu na učestalosti pojedinih smjerova u terminima 01 i 13 h za oba mjeseca na sl. 2.



Sl. 1. Vertikalni profili potencijalne temperature i vjetra za Zagreb. Srednje mjesečne vrijednosti za ožujak i travanj 1972–1981 01 i 13 h SEV. N^2 je Brunt-Vaisala frekvencija $10^{-4} s^{-2}$, V_{s1} su srednje skalarne vrijednosti vjetra (brzine u $m s^{-1}$), a strelice označuju vektorske srednjake vjetra ($m s^{-1}$). Pune linije označuju vertikalni profil potencijalne temperature (K), a crtkane linije u 13 h pokazuju profil od 01 h da se mogu uočiti 12-satne razlike.

Fig. 1. Vertical profiles of potential temperature and wind for Zagreb. Mean monthly values for March and April 1972–1981, 00 and 12 GMT. N^2 is Brunt-Vaisala frequency $10^{-4} s^{-2}$, and V_s are mean scalar winds (speed in $m s^{-1}$), and arrows indicate vector wind mean ($m s^{-1}$). Solid lines are potential temperature profiles (K), and dashed lines at 13 h indicate profiles from 01 h in order to follow 12-hr differences.

U ožujku je najveća stalnost vjetra u oba termina pri tlu, a po učestalostima se ističe N smjer (silazni vjetar obronka) noću, i S smjer (vjetar uz obronak) danju, koji su dobro poznati i nalazimo ih pri tlu u normali (sl. 1). NE i SW vjetar koji su rezultat strujanja oko Alpa i prate pojavu N– i S– föhna na tom području javljaju se u oba termina u tom mjesecu, ali se u vektorskom srednjaku pobijaju. Prema tome NW – NNW vektorski srednjak u 01 h rezultanta je noćnog lokalnog vjetra i promjenljivog strujanja oko Alpa u donjoj troposferi ispod vrhova planina, a ruža vjetra u tom terminu ilustrira slučaj kada se na 2 i 3 km visine ne pojavljuje niti jedan dan vjetar iz NW kvadranta u kojem je smješten vektorski srednjak. Na 5 km vektorski srednjaci imaju u oba termina SW smjer, ali je stalnost još uvijek mala za tu visinu.

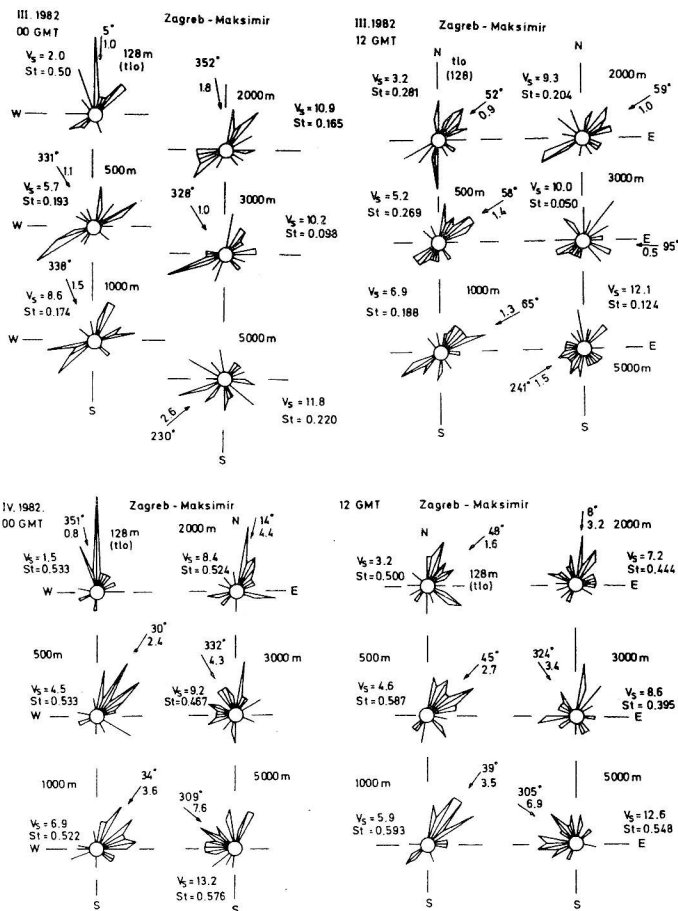
To znači da je makrovremenska situacija bila nestalna u dubokom sloju atmosfere, jer je na toj visini orografski utjecaj Alpa već vrlo malen.

Zaključak da je vektorski srednjak rezultat matematičkog osrednjavanja promjenljivih smjerova i nije vezan uz stvarni prevladavajući vjetar ne predstavlja dakako novu spoznaju, ali se ovdje ističe uloga lokalnog vjetra u donjem graničnom sloju, uloga interakcija sa sistemima mezorazmjera do 3 km visine i odraz makrovremenskog stanja na većim visinama na formiranje vektorskog srednjaka.

Nasuprot ožujku slika 2 pokazuje da u travnju 1982. vektorski srednjak vjetra odražava prevladavajuće strujanje na nekoj visini. Vidimo da se na 500 i 1000 m samo u nekoliko dana pojavljuje vjetar koji nije iz NE kvadranta, dok iznad 3000 m već prevladava W – NW smjer.

Usporedba srednjih mjesečnih vertikalnih profila potencijalne temperature s normalom za Zagreb (sl. 1 i 3) pokazuje da su u oba mjeseca temperature bile niže, a odstupanja veća u 13 nego u 01 h, naročito u travnju.

Razlike u temperaturi pojedinih slojeva odrazile su se i na raspodjelu statičke stabilnosti izražene pomoću



Sl. 2. Ruže vjetra s oznakom čestina smjerova za svaki dan u mjesecu i vektorski srednjaci za označene visine s oznakom smjera i brzine uz strelice, V_s su skalarni srednjaci ($m s^{-1}$), a St stalnosti. Ožujak i travanj 1982. za Zagreb–Maksimir.

Fig. 2. Wind roses indicating direction frequencies for each day in the month and vector means for indicated heights and speed and direction written close to the arrows, V_s are scalar means ($m s^{-1}$), and St is steadiness. March and April 1982 for Zagreb–Maksimir.

Brunt-Väisälä frekvencija $N^2 = g/\theta \partial \theta / \partial z$, koja je na slikama prikazana za donja dva sloja po 100 m, a za više slojeve po 500 m debljine. U odnosu na normalu, u SOP je stabilnost u donjim slojevima bila manja, a u višim veća. Specifična karakteristika ožujka 1982. je bila naročito velika stabilnost viših slojeva, što je rezultat čestih visinskih inverzija u tom mjesecu. Međutim, one u srednjaku nisu dovoljno uočljive zbog naglih vremenskih promjena visine baze inverzije i debljine stabilnog sloja.

4. SREDNJE 6-SATNE PROMJENE VERTIKALNIH PROFILA TEMPERATURE I VJETRA U ZAGREBU I PULI

Raspoloživost 6-satnih radiosondažnih podataka nam omogućava da bolje pratimo promjene vertikalne struk-

ture atmosfere i da odredimo neke karakteristike graničnog sloja uz redovne aerološke termine (u 01 i 13 h SEV) i u 07 h približno pri izlasku Sunca, te u 19 h pri zalazu kada se počinje stvarati prizemna inverzija temperature.

Tabela 1 i slike 3 i 4 pokazuju da je od četiri promatrana termina srednja temperatura kroz cijeli sloj viša u Puli nego u Zagrebu, iako se razlika smanjuje s visinom.

Amplituda temperature je u nižim slojevima mnogo manja u Puli, što je poznata karakteristika maritime klime, a ovi podaci pokazuju da je u višim slojevima, 2–3 km visine, razlika ekstremnih vrijednosti iz raspoloživih termina ista ili veća u Puli nego u Zagrebu.

Maksimalni 6-satni pad temperature pri tlu je u Zagrebu od 19 do 01 h, pa je time prizemna inverzija naj-

Tabela 1. Srednje mjesečne temperature ($^{\circ}\text{C}$) na odabranim visinama donje troposfere za ožujak i travanj 1982. u 6-satnim terminima za Zagreb (gore) i Pulu (dolje).

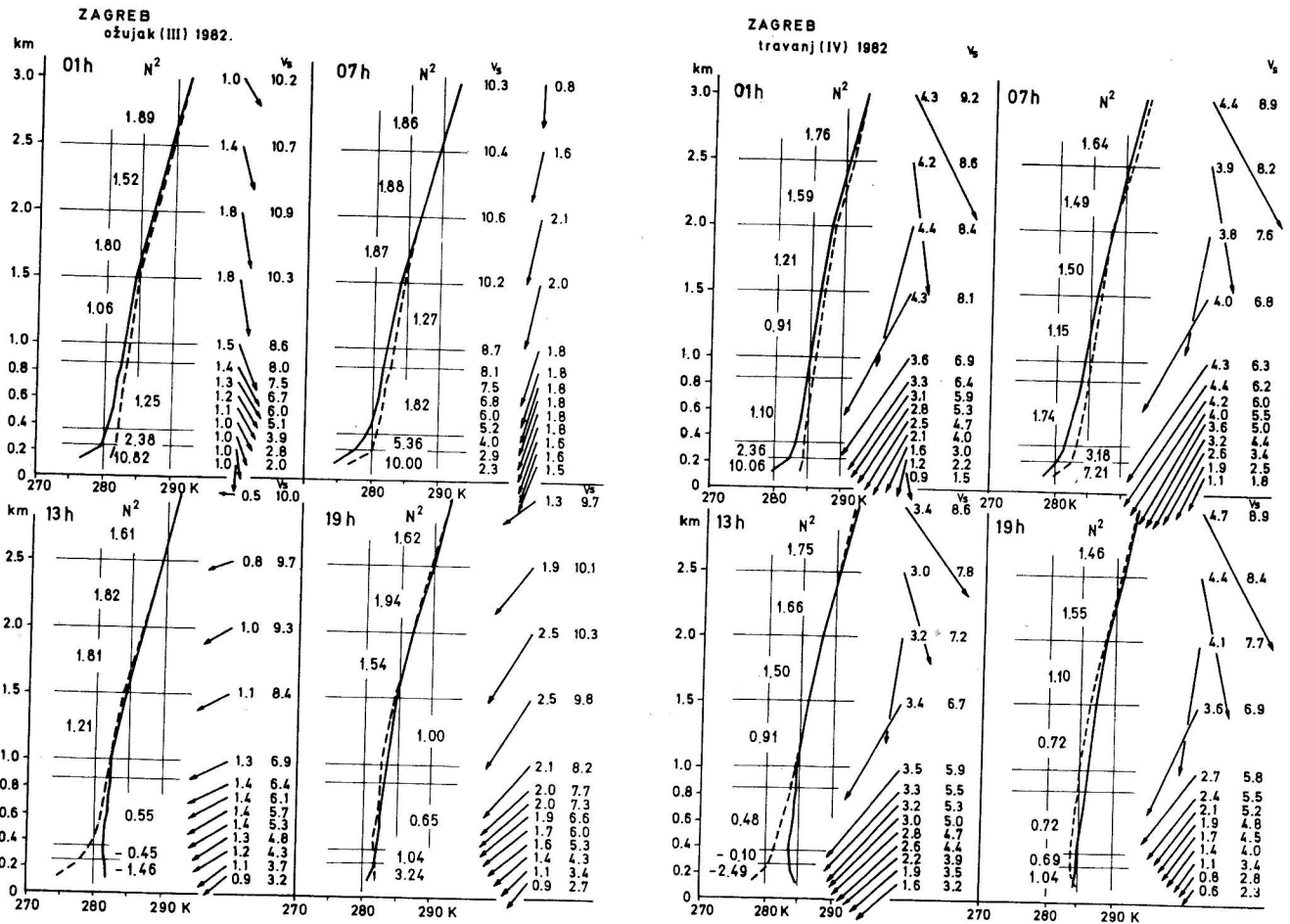
Tab. 1. Mean monthly temperature ($^{\circ}\text{C}$) for selected heights of the low troposphere for March and April 1982 in six – hourly intervals for Zagreb (above) and Pula (below).

ZAGREB

mjesec month	OŽUJAK MARCH				TRAVANJ APRIL			
	01	07	13	19	01	07	13	19
sat/hr vis. (m)								
128	3.9	1.7	9.2	7.8	6.3	4.9	11.3	10.7
178	5.6	2.9	8.4	7.9	7.8	5.6	10.3	10.4
228	6.0	3.5	7.8	7.8	8.2	6.0	9.6	10.1
328	5.7	4.1	6.7	7.1	7.9	5.9	8.6	9.3
428	5.2	4.0	5.8	6.3	7.3	5.6	7.6	8.5
528	4.6	3.6	4.9	5.5	6.7	5.1	6.7	7.7
628	3.9	3.0	4.1	4.7	5.9	4.5	5.9	6.9
728	3.3	2.4	3.3	3.9	5.2	4.1	5.1	6.2
828	2.6	1.8	2.6	3.2	4.6	3.5	4.4	5.5
1 000	1.5	0.7	1.2	1.9	3.3	2.4	2.9	4.2
1 500	-1.9	-2.4	-2.0	-1.6	-0.3	-0.9	-0.7	0.4
2 000	-4.3	-5.0	-4.4	-4.4	-3.5	-3.7	-3.5	-2.9
2 500	-7.1	-7.1	-6.8	-6.6	-6.2	-6.5	-6.1	-5.7
3 000	-9.4	-9.6	-9.5	-9.3	-8.7	-9.2	-8.6	-8.6

PULA

43	7.3	6.8	10.9	8.5	9.7	9.8	14.0	12.3
93	7.6	7.2	10.0	8.4	10.4	10.1	13.0	11.9
143	7.8	7.4	9.3	8.2	10.9	10.3	12.2	11.6
243	7.4	7.0	8.4	7.7	10.8	10.1	11.3	11.1
343	6.9	6.6	7.6	7.1	10.3	9.6	10.6	10.5
443	6.4	6.1	6.9	6.6	9.8	9.1	9.9	9.9
543	5.9	5.5	6.2	5.9	9.2	8.6	9.2	9.3
643	5.2	5.0	5.5	5.4	8.5	8.0	8.6	8.7
743	4.6	4.3	4.9	4.7	7.8	7.3	7.9	8.1
1 000	2.9	2.8	3.1	2.9	6.0	5.7	6.1	6.3
1 500	-0.4	-0.3	0.0	-0.1	2.5	2.3	2.2	2.8
2 000	-3.5	-3.2	-2.7	-3.3	-0.7	-1.0	-0.7	-0.7
2 500	-6.2	-6.0	-5.4	-6.0	-4.0	-4.1	-3.5	-3.8
3 000	-8.8	-9.0	-8.2	-8.8	-7.0	-7.1	-6.3	-6.7



Sl. 3. Vertikalni profili temperature i vjetera do 3 km visine kao na sl. 1, ali za 6-satne vremenske intervale (SEV) ožujak i travanj 1982, Zagreb. Crtkane linije označuju profil temperature iz prethodnog termina.

Fig. 3. Vertical wind and temperature profiles as on Fig. 1, but for six-hourly intervals (MET) March and April 1982, Zagreb. Dashed lines indicate temperature profiles from the previous term (six hr differences)

jača u 01 h. Iznad tla je pad temperature veći u slijedećem intervalu, 01–07 h, a u 07 h je u cijelom promatranom sloju temperatura minimalna.

To je slučaj i u Puli, s izuzetkom prizemne temperature u 07 h u travnju koja je u tom terminu već malo viša nego u 01 h.

S obzirom na to da značajnije zagrijavanje u razdoblju 07–13 h u Zagrebu zahvaća dublji sloj, nestabilnost donjeg graničnog sloja je u 13 h manja nego u Puli, ali je u 19 h samo u plitkom sloju uz tlo temperatura niža nego u 13 h. Daljnje zagrijavanje atmosfere iznad tla ima za posljedicu smanjenu stabilnost debljeg sloja donje troposfere na području Zagreba u kasnim poslijepodnevni satima. To je vjerojatno glavni razlog za kasni razvoj konvektivne naoblake i čestu pojavu intenzivnih pljuskova u večernjim satima.

Za razliku od zagrebačkog profila temperature u Puli je u 19 h u ožujku temperatura već kroz cijeli sloj niža nego u 13 h, a u travnju je još samo neznatno viša u sloju 500–1500 m u kojem je u tom terminu atmosfera stabilnija nego u Zagrebu.

Prema navedenim promjenama temperature može se zaključiti da su na obe lokacije karakteristične dvije vi-

sine koje se odnose na donji dio graničnog sloja: visina koja noću pokazuje najjače hlađenje uz tlo i predstavlja prizemnu inverziju temperature najizraženiju u Zagrebu u 01 h, te visina donjeg nestabilnog sloja u 13 h, jače izraženog ali i plićeg, u Puli. Ove visine su vremenski promjenljive i u 07 i 19 h pokazuju dokle se donja troposfera noću jače ohladi i danju zagrije, a strogo su ovisne o lokalnim prilikama. U Puli sloj izrazitijeg hlađenja i zagrijavanja s dnevnom amplitudom većom od 1°C ne iznosi više od 200 m nad tlom, dok se u Zagrebu proteže i iznad 1.5 km visine.

S obzirom da je dnevni hod vjetera znatno ovisan o temperaturnim prilikama na nekom lokalitetu, logično bi bilo očekivati da se karakteristične visine donjeg graničnog sloja mogu odrediti i iz vertikalnog profila vjetera. Međutim, ove visine prati maksimalno smicanje vjetera, pri čemu se razvija turbulencija, pa se vjerojatno nagle promjene ne mogu dulje održati. Pored toga, vjetar je jače od temperature podložan promjenama koje izazivaju interakcije lokalnih i mezorazmjera. Zato visine koje ograničavaju danji i noćni vjetar obronka u Zagrebu i obalni vjetar u Puli nisu oštrije prikazane u srednjaku radiosondažnih podataka.

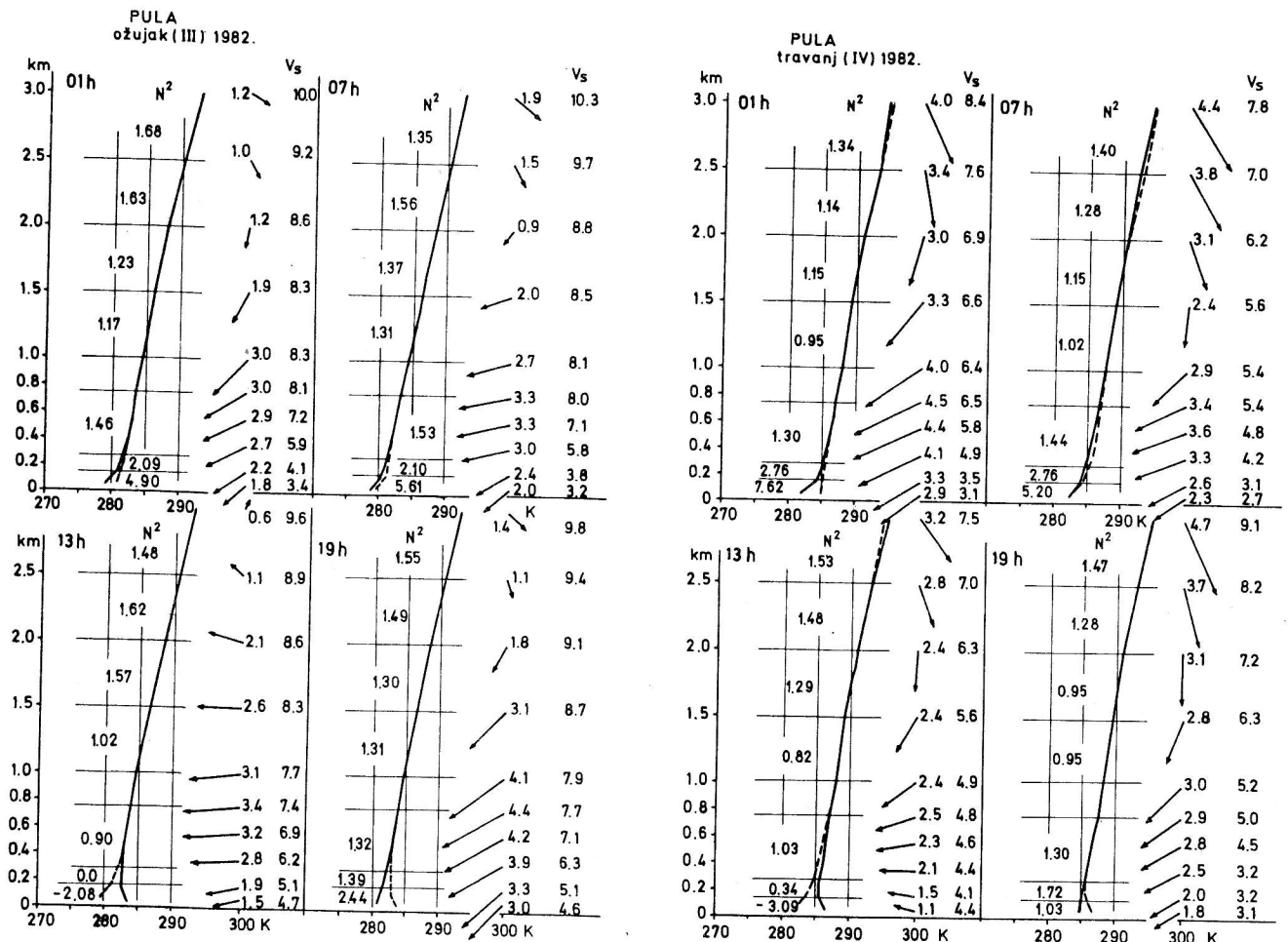
Nestalnost makrostanja u ožujku jače je odražena na profilu vjetra u Zagrebu nego u Puli. Pula u oba mjeseca pokazuje utjecaj velike čestine dana s burom sa skretanjem vektorskog srednjaka vjetra od NE u nižoj troposferi na NW pri vrhu sloja. Jedino u podnevnom terminu ožujka raspodjela vjetra u Puli znatno odstupa od ostala tri termina, s tim da u dubljem sloju ostaje istočna komponenta, a na vrhu sloja vektorski srednjak skreće na SW uz vrlo malu stalnost vjetra. Skretanje vektorskog srednjaka prema SW smjeru na toj visini u podnevnom terminu već je uočena karakteristika dugogodišnjih vertikalnih profila vjetra u Zagrebu (Jurčec, 1986), a naročito se ističe ljeti kao posljedica termičkog efekta zagrijavanja alpskog masiva.

Srednji ožujski profil vjetra u Zagrebu, jedini koji nema promjenu smjera vjetra u višim slojevima, ukazao je na jednu neočekivanu karakteristiku – maksimum skalarog srednjaka u svim terminima osim podnevnog, na visini od 2 km, tj. na istoj visini na kojoj ostali profili pokazuju maksimalno smicanje smjera.

Treba naglasiti da pojava vjetra ili niske mlazne struje u noćnom graničnom sloju orografskog područja nije ne-

poznata pojava (npr. Reiter i Tang, 1984), a zna se i za njezinu povezanost s vrlo stabilnim slojevima i inverzijom temperature (Blackadar, 1957; Mahrt, 1985). Međutim, činjenica da se ovaj maksimum pojavljuje u ožujku u uvjetima izrazitog nestalnog stanja atmosfere pokazuje da u takovom stanju lokalni vjetar može biti povremeno jak, ali suprotnih smjerova koji se u vektorskom srednjaku pobijaju. To već jasno ukazuje na povezanost smjera lokalnog vjetra s promjenama planinskog otpora tlaka, koji je u analizi Hafnera i Smitha također pokazivao mali vektorski srednjak za razdoblje SOP, ali s većom promjenljivosti pojedinih vektora u ožujku. Ovi rezultati su u skladu s teorijskim prognozama Bannona iznesenim u Uvodu, prema kojima akceleracija nema direktni utjecaj na srednje strujanje u orografskom području.

Proučavanje dinamičke osnove niske mlazne struje na području Alpa zahtijeva daljnje detaljne analize posebnih slučajeva koje su u toku istraživanja. Preliminarni rezultati idu u prilog zaključcima Paeglea i dr. (1984), prema kojima struktura ovog mlaza više ovisi o razdvajanju struje oko Alpa nego o fluktuacijama uzgona iznad nagnutog terena ili o dnevnim oscilacijama vertikalnog turbulentnog transporta. Iz toga se može pretpostaviti



Sl. 4. Vertikalni profili temperature i vjetra kao na sl. 3 samo za Pulu.

Fig. 4. Vertical wind and temperature profiles as on Fig. 3, but for Pula.

da je dinamika mezoprocesa unutar graničnog sloja kompleksnog terena bitno različita od dinamike procesa malih razmjera na području izoliranih planina.

5. ZAKLJUČAK

Jedan od nerješanih problema meteorologije je pitanje kako planinska barijera mezorazmjera, kao što su evropske Alpe, utječe na razvoj atmosferskih fenomena lokalnih razmjera. Ovi fenomeni se javljaju kao posljedica modifikacije polja temperature, tlaka i vjetra na planinskoj prepriči a stupanj modifikacije i stalnost atmosferskog stanja nad tim područjem ovise o karakteristikama atmosferske cirkulacije u makrorazmjerima.

Prikazane analize u SOP odrazile su dvije karakteristike srednjeg stanja atmosfere na području Alpa:

- vrlo nestalno stanje u ožujku s čestim izmjenama tipova sinoptičkih situacija i naglog razvoja mezoprocesa kao posljedice interakcija frontalnih sistema i orografije, i
- dugo razdoblje velike stalnosti atmosferskog makrostanja u travnju s prodorima hladnog zraka i bloking efektima na sjevernoj navjetrini Alpa, tipičnim za situacije s burom.

Ove karakteristike nisu dovoljno izražene ako se promatraju srednja stanja atmosfere za cijelo razdoblje SOP, što je učinjeno u mnogim ALPEX analizama.

Srednji mjesečni profili vjetra do 3 km visine na obe promatrane lokacije pokazuju vertikalnu raspodjelu koja odgovara situacijama s burom na Jadranu, s NE strujanjem u nižim slojevima, a NW iznad 2 km visine. Ova raspodjela se bolje ističe u travnju kada je stalnost vjetra veća kao posljedica veće perzistencije makrosistema.

U ožujku su tipovi situacija s burom bili jače povezani s ciklogenetičkim procesima u zapadnom Sredozemlju, a raspodjela vjetra je izraženija u Puli nego u Zagrebu zbog manjeg utjecaja lokalnih efekata i jačeg vjetra u situacijama s burom. Pri razvoju ovih situacija prodoru hladnog zraka uz NE vjetar u donjoj troposferi prethodi pojačano SW strujanje s južnim föhnom preko Alpa, pa promjene smjera strujanja oko Alpa, uz vjetar obronka, daju u Zagrebu vektorski srednjak koji do 3 km visine ne opisuje stvarno prevladavajuće strujanje. Međutim, vrlo mala stalnost vjetra je jedna od lokalnih karakteristika koja odražava nestacionarno stanje donje troposfere u makro i mezorazmjerima.

Lokalne razlike srednjih profila u Zagrebu i Puli se mogu pratiti kroz cijeli sloj donje troposfere, ali su one značajnije u donjem graničnom sloju i naročito dolaze do izražaja u dnevnom hodu temperature i vjetra. U Zagrebu je naglašena noćna sjeverna komponenta vjetra niz obronak s izraženom inverzijom temperature a u Puli danja istočna komponenta obalne cirkulacije u plitkom nestabilnom sloju uz tlo. U izvanrednim terminima motrenja, 07 i 19 h, ističe se mnogo dublji sloj dnevnog zagrijavanja i noćnog hlađenja u Zagrebu, što se odražava i na spomenutom utjecaju lokalnih efekata na vektorski srednjak vjetra.

Povećana stabilnost viših slojeva, naročito u ožujku, odraz je čestih inverzija temperature koje prate promje-

nu smjera vjetra pri vrhovima Alpa, ali one nisu u srednjaku dovoljno uočljive zbog velike varijabilnosti baze inverzije i debljine stabilnog sloja.

Profili vjetra pokazuju da je u SOP srednja visina najizrazitije promjene smjera vjetra bila 2 km, što odgovara strujanju oko Alpa na promatranim lokalitetima. Na istoj visini zagrebački profil vjetra u ožujku ističe maksimum brzine u svim terminima osim podnevnog. Iz ove analize se može zaključiti da su male stalnosti vjetra pri vrhu promatranog sloja u Zagrebu rezultat suprotnih strujanja oko Alpa koja se u srednjaku ukidaju na isti način i zbog istih uzroka kao što se ukidaju vektori planinskog otpora tlaka u analizi Hafnera i Smitha (1985). Time se ove analize povezuju i sa rezultatima modela Bannona (1985) za nestacionarnost toka u uvjetima strujanja oko planine.

Povezanost maksimuma u lokalnom profilu vjetra s akceleracijom i planinskim otporom tlaka čini se logičnom posljedicom deformacije frontalnog sistema na području Alpa. Međutim, za objašnjenje reakcije akceleracije nužno je promatrati pojedinačne slučajeve, što će biti prikazano u nastavku ovog rada.

LITERATURA

- Bajić, A., 1984: Zimski prodori hladnog zraka preko Zagreba, Magistarski rad, Sveučilište u Zagrebu, 125 str.
- Bannon, P. R., 1985: Flow acceleration and mountain drag, *J. Atmos. Sci.* 42, 2445–2453.
- Banta, R. M., 1986: Daytime boundary layer evolution over mountainous terrain. Part II: Numerical studies of upslope flow duration, *Mon. Wea. Rev.* 114, 1112–1130.
- Blackadar, A. K., 1957: Boundary layer wind maxima and their significance for the growth of nocturnal inversions, *Bull. AMS*, 38, 283–290.
- Buzzi, A., 1984: Alpine cyclogenesis events during ALPEX, *Riv. Meteor. Aero.* 44, 61–67.
- Hafner, T. A. i R. B. Smith, 1985: Pressure drag on the European Alps in the relation to synoptic events, *J. Atmos. Sci.* 42, 562–575.
- Jurčec, V., 1983: O lokalnim karakteristikama temperature i vjetra na Jadranu za vrijeme SOP ALPEX, Zbornik radova „Dinamika vjetra i strujanja u sjevernom Jadranu“ – ALPEX rezultati, Split, 7–8 lipanj 1983. Izdao SHMZ i IOR, 5/1–10.
- Jurčec, V., 1985: Lokalni režim vjetra na području Zagreba i planinska cirkulacija, *Geofizika* 2, 121–140.
- Jurčec, V., 1986: Mean monthly wind hodographs in the lower troposphere in Zagreb, *Geofizika*, Simpozij "Observations and modelling in geophysics", Zagreb, 11–13 June 1986 (in press).
- Katušić, Z. i V. Juras, 1983: Klimatska analiza mjesečnih temperatura zraka i mjesečnih količina oborine na području Hrvatske u Specijalnom ALPEX Periodu, Zbornik radova sa skupa „Dinamika vjetra i strujanja u sjevernom Jadranu“, ALPEX rezultati, Split, 7–8 lipanj 1983. 4/1–16.
- Lin, Y. L., i R. B. Smith, 1986: Transient dynamics of airflow near a local heat source, *J. Atmos. Sci.* 43, 40–49.
- Mahrt, L., 1985: Vertical structure and turbulence in the very stable boundary layer, *J. Atmos. Sci.* 42, 2333–2349.
- Pierrehumbert, R. T., 1984: Formation of shear layers upstream of the Alps, *Riv. Meteor. Aero.* 44, 237–248.
- Pierrehumbert, R. T. i B. Wyman, 1985: Upstream effects of mesoscale mountains, *J. Atmos. Sci.* 42, 977–1003.
- Paegle, J. i J. N. Paegle, M. McCorcle i C. O'Brien, 1984: The dynamical basis of a low-level jet during ALPEX, *Riv. Meteor. Aero.* 44, 127–143.
- Reiter, E. R. i M. Tang, 1984: Plateau effects on diurnal circulation patterns, *Mon. Wea. Rev.* 112, 638–651.
- Smith, R. B., 1979: The influence of mountains on the atmosphere, *Advances in Geophysics*, 21.
- Smith, R. B., 1982: Synoptic observations and theory of orographically disturbed wind and pressure, *J. Atmos. Sci.* 39, 60–70.
- WMO/ICSU, 1982: ALPEX – Preliminary scientific results. Geneva, GARP – ALPEX no. 7.

SUMMARY

One of the striking features observed during the ALPEX field phase was the difference in flow below the mountain-top level, going around the mountain, and above this level going over the mountain, with a shear layer probably influencing most of the other orographic effects in this region (Pierrehumbert, 1984).

In this paper we describe some of the local scale phenomena making use of six-hourly radiosounding data from the ALPEX SOP (March and April 1982) for Zagreb and Pula. It is shown that local effects are more expressed in Zagreb influencing the deeper layer above the ground, with stronger diurnal heating lasting longer than in Pula, although Pula has a higher mean temperature throughout the considered layer of 3 km (Table 1).

Several of the basic temperature characteristics are: nocturnal cooling, resulting with the deepest stable layer in the early morning (7 h), and surface heating, leading to a low level unstable condition in the midday term at both localities, but keeping the atmosphere above the ground warmer at 19 h than at 13 h in Zagreb.

The temperature features also influence the local wind distribution. The ground level state in the maritime climate of Pula influences only a relatively shallow boundary layer in which we find in April a ESE daytime sea breeze component (13 h, Fig. 4), while in all other terms a NE bora direction is clearly expressed. On the contrary, in Zagreb, only at midnight term (01 h, Fig. 3) does the wind turn to a more steady northerly direction, known as a local downslope wind component.

In March 1982 the vertical wind profile in Zagreb shows how the larger scale transient motion, characteristic of atmospheric circulation in this month, influences the local vertical

distribution of the wind vector mean. Due to the developed downslope wind component at 01 h wind vector mean at this time differs from the other term averages in Zagreb and all of them in Pula, which indicates the vertical distribution characteristic for bora type situations. At both localities the wind vector mean shows much lower steadiness in March than in April which is attributed to two main and opposite directions of the flow around the Alpine barrier, NE and SW, being nearly cancelled in the mean (Fig. 2).

In the calculation of mountain pressure drag Hafner and Smith (1985) found that the mean drag vectors for the entire SOP are relatively small, apparently due to the near cancellation of N – S components resulting from predominantly E – W orientation of the Alps. Although they did not separate obviously quite different drag mean vectors in March and April, their analysis emphasizes the short term drag fluctuations and the large drag values for S – and N – foehn episodes preceding and following the March cases of lee cyclogenesis. These mountain drag vectors as well as the local winds considered in this study reflect the sequences of events associated with the frontal passages over the Alpine region.

Temporarily large wind speed during the bora events or a deep NE current as well as the strongest SW winds of warm pre-frontal episodes are the cause for the wind speed maxima seen in the Zagreb's profile of March at 2 km heights (V_s on Fig. 3). Although such a maximum does not appear at noontime term, some preliminary analyses of case studies suggest that, in agreement with the results by Pleagle et al. (1984), the maximum speed in the average profile is more likely the result of a low-level jet due to the flow splitting around the Alps than the consequence of the diurnal oscillations of turbulent transports.