

ANALIZA JAKOG VISINSKOG VJETRA I TROPOPAUZE IZNAD SJEVEROZAPADNE HRVATSKE I ZAPADNE B I H

An analysis of strong winds aloft and of the tropopause above NW Croatia and Western Bosnia and Herzegovina

VESNA MALNAR-TOMIĆ

Zapovjedništvo HRZ i PZO
Maksimirska 63, 10000 Zagreb, Hrvatska

Primljeno: 27. rujna 1995, u konačnom obliku 10. listopada 1995.

Sažetak — Analiza je pokazala da vjetar skreće visinom s preovlađujućeg južnog (180) i jugozapadnog smjera (210) u prizemlju na zapadni i pojačava se. Mlazna struja jest preovlađujućeg zapadnog smjera, brzina joj varira u širokom dijapazonu, nije povezana s javljanjem fenskog vjetra u prizemlju i ne pokazuje tendenciju češćeg pojavljivanja na nekoj određenoj izobarnoj plohi. Jednostruka i dvostruka tropopauza pojavljuju se podjednako često, a trostruka veoma rijetko.

Ključne riječi: fenski vjetar, mlazna struja, tropopauza.

Abstract — This analysis has proved that this predominantly southerly (180) and south-westerly (210) wind changes direction near the surface, turning into a westerly wind and gaining speed. The jet stream is of predominantly western direction, its speed varies widely, it is not connected with the occurrence of the surface phön and does not show a tendency of appearance on any particular isobaric plane. A single and double tropopause are equally frequent while a treble tropopause is extremely rare.

Key words: phön, jet stream, tropopause.

1. UVOD

Da vjetar skreće visinom, u meteorologiji je odavno poznato (Dobrilović, 1960; Radinović, 1969). Poznato je i to da je skretanje vjetra visinom povezano s određenim tipom vremena. U sloju u kojem vjetar visinom skreće udesno dolazi do porasta temperature zraka – topla advekcija, a skretanje vjetra visinom ulijevo u vezi je sa opadanjem temperature u sloju – hladna advekcija. Prema tome, promjena smjera vjetra visinom može se koristiti u kratkoročnoj prognozi vremena. Odredene zakonitosti skretanja vjetra visinom mogu se koristiti pri procjeni smjera i brzine vjetra na potrebnoj visini, ukoliko se ne raspolaze motrenim podacima, što može biti ponekad veoma važno, naročito u

ratnim uvjetima (npr. za potrebe ratnog zrakoplovstva).

Pod pojmom mlazna struja podrazumijeva se zona vrlo jakih vjetrova (brzine $\geq 30 \text{ ms}^{-1}$ na velikim visinama), koji utječu na putnu brzinu zrakoplova na tim visinama, bilo da je povećavaju pri lednom vjetru, bilo da je smanjuju pri letu s čeonim vjetrom (iz razgovora, iskustva i stručnih analiza vojnih pilota). Pri letu u okomitom smjeru na tok mlazne struje dolazi do najvećeg bočnog skretanja zrakoplova sa zadane maršrute i tada se javljaju najveći kutovi zanošenja. U svakom slučaju, mlazna struja može olakšati, otežati ili potpuno onemogućiti izvršenje borbenih, izviđačkih ili lovačkih zadataka vojnog zrakoplovstva.

Prisustvo mlazne struje većinom je vezano uz ciklonalnu aktivnost pri tlu, te postoji određena veza mlazne struje i karaktera vremena.

U području umjerenih geografskih širina na visini od 10 do 12 km postoji sloj debljine 1–2 km, gdje dolazi do prestanka, a ponekad samo do usporenja pada temperature. Taj relativno tanak sloj atmosfere naziva se tropopauza (naprijed navedeni autori). Prije se smatralo da se tropopauza proteže kao neprekinut sloj od ekvatora do polova, ali su istraživanja poslije pokazala da se tropopauza može sastojati i od više slojeva, koji nisu međusobno spojeni, te se nad istim mjestom mogu javiti dvije ili tri tropopauze.

Tropopauza je najniža nad polovima (oko 9 km), a najviša iznad ekvatora (oko 17 km). Najveći joj je nagib nad područjem umjerenih geografskih širina, a upravo iznad najvećeg nagiba tropopauze jesu i najveći temperaturni gradijenti – to je ujedno i područje najvećih ciklonalnih aktivnosti.

U sloju do donje granice tropopauze temperatura visinom opada, a zatim u tropopauzi ostaje nepromijenjena ili čak malo poraste. Posljedica toga jest brže opadanje gustoće zraka visinom u sloju tropopauze, što dovodi do povećane potrošnje goriva pri letu unutar tropopauze. Opadanje gustoće zraka u tropopauzi smanjuje ukupnu aerodinamičku silu (uzgon), a time i operativni vrhunac leta zrakoplova. Zato su vojni piloti supersoničnih zrakoplova (s kojima sam radila dulji niz godina), polazeći na probne letove ili letove do plafona zrakoplova (maksimalna visina na kojoj zrakoplov može letjeti), obavezno tražili podatke o visini tropopauze. Na pitanje osjećaju li nešto u tom sloju, odgovarali su: "Ništa, samo po instrumentima registriramo da smo u sloju tropopauze."

2. PODACI

U radu je analizirano razdoblje od 12. prosinca 1978. do 9. travnja 1979. Korišteni su radiosondažni podaci meteorološke postaje Zagreb i podaci o prizemnom vjetru za mjesto u zapadnom dijelu Bosne i Hercegovine, geografski blizu Zagreba, a koje karakterizira fenski vjetar, vjetar na rafale, mahove, neujednačene brzine iz jugozapadnog smjera.

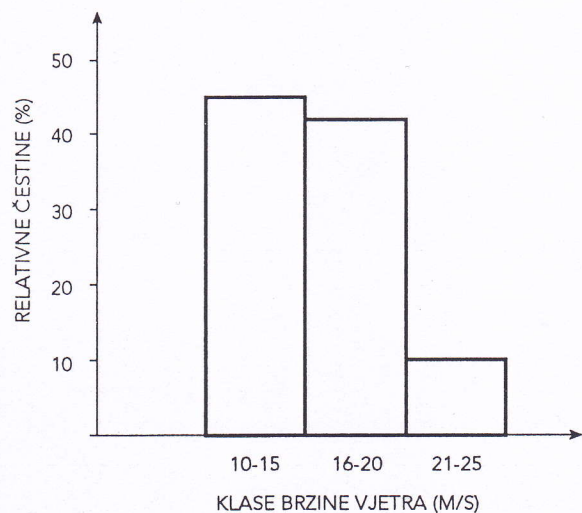
Od svih izobarnih ploha neke su posebno važne i nazivamo ih standardne izobarne plohe, a to su 1000, 850, 700, 500, 400, 300, 200, 100 hPa itd.

Ploha od 1000 hPa uzima se za standardnu zato što je ona praktično na nivou mora, a ploha od 850 hPa zato što je približno na nivou kondenzacije (1500 m). Na 3000 m jest ploha od 700 hPa, i to je srednja visina donje troposfere, dok srednju troposferu na 5500 m predstavlja ploha od 500 hPa. U ovom radu promatrane su tri izobarne plohe: 850, 700 i 500 hPa. Kriteriji za odabir podataka bili su sljedeći: na jednoj od tih ploha brzina vjetra morala je biti $\geq 10 \text{ ms}^{-1}$ ili je registrirana mlazna struja ili je zabilježena pojava fenskog vjetra $\geq 10 \text{ ms}^{-1}$ u prizemlju (takvi su kriteriji izabrani u dogovoru s vojnim pilotima, ovisno o njihovim zadacima). Na taj način u promatranom periodu dobiven je uzorak s ukupno 70 slučajeva, što govori o reprezentativnosti uzorka. Za isto razdoblje uzeti su podaci o mlaznim strujama i tropopauzi.

3. REZULTATI

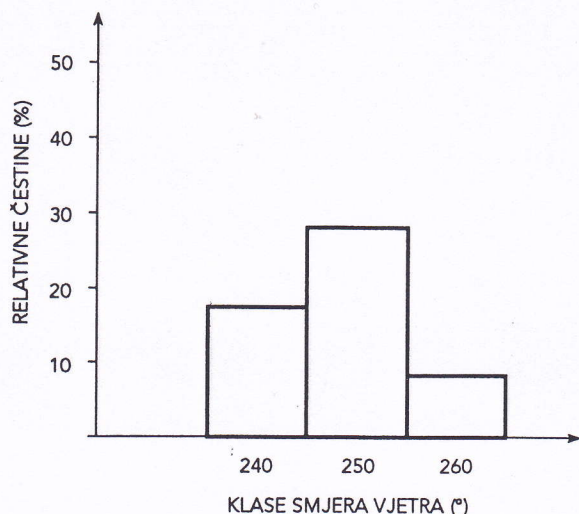
3.1. Analiza vjetra na izobarnim ploham

Za plohu 850 hPa dobiveni rezultati pokazali su da se vjetar brzine $\geq 10 \text{ ms}^{-1}$ pojavio u 70% slučajeva u promatranom uzorku, te da se podjednako često javlja vjetar brzine $10\text{--}15 \text{ ms}^{-1}$ (44,8%) i $16\text{--}20 \text{ ms}^{-1}$ (42,8%), dok se vjetar brzine $21\text{--}25 \text{ ms}^{-1}$ javio u samo 12,2% slučajeva. Preovlađujući smjer vjetra jest 250° (28,6%), zatim smjer 240° (18,3%), dok 7,9% otpada na smjerove 230° , 260° i 270° .



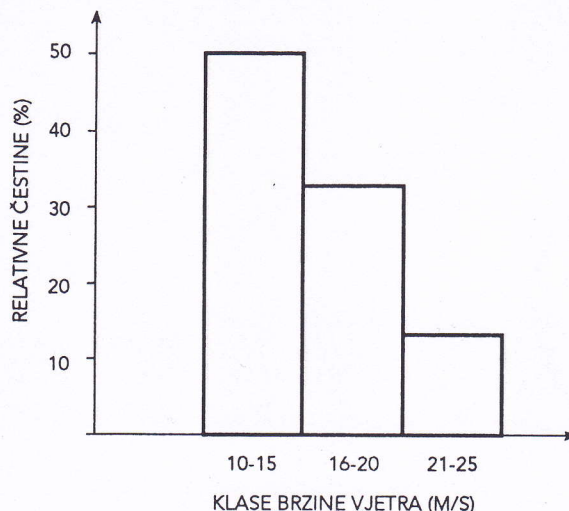
Slika 1. Brzina jakog vjetra na plohi 850 hPa iznad Zagreba u razdoblju prosinac 1978-travanj 1979.

Figure 1. Strong wind speed at the 850 hPa above Zagreb in the period December 1978-April 1979.



Slika 2. Prevladavajući smjer jakog vjetra na plohi 850 hPa iznad Zagreba u razdoblju prosinac 1978 — travanj 1979.

Figure 2. Prevailing strong wind direction at the 850 hPa above Zagreb in the period December 1978—April 1979.



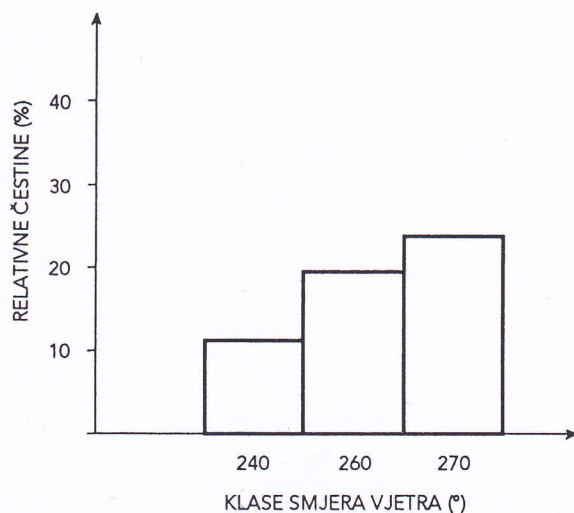
Slika 3. Brzina jakog vjetra na plohi 700 hPa iznad Zagreba u razdoblju prosinac 1978—travanj 1979.

Figure 3. Strong wind speed at the 700 hPa above Zagreb in the period December 1978—April 1979.

Pri analizi vjetra na plohi 700 hPa dobiveni rezultati pokazali su da se vjetar brzine $\geq 10 \text{ ms}^{-1}$ javio u 80% slučajeva, što upućuje na zaključak da se na toj plohi javlja češće nego na plohi 850 hPa, najčešće je brzine $10\text{--}15 \text{ ms}^{-1}$ (51,8%), zatim $16\text{--}20 \text{ ms}^{-1}$ (33,9%), a u 12,5% brzina je iznosila $21\text{--}25 \text{ ms}^{-1}$. Na toj plohi preovlađujući smjer jest 270° (25,0%), u 19,7% javljaju se podjednako smjerovi 250° i 260° , a u 10,7% javio se vjetar iz smjera 240° .

Usporedba s rezultatima na plohi 850 hPa ukazuje na skretanje vjetra udesno. Konačno, rezultati analize na plohi 500 hPa pokazali su da se u 95,7% slučajeva javio vjetar brzine $\geq 10 \text{ ms}^{-1}$, što znači u odnosu na prethodne dvije plohe da se na toj plohi javlja češće, odnosno da je pojava vjetra $\geq 10 \text{ ms}^{-1}$ gotovo redovita pojava. Najčešće je registrirana brzina $16\text{--}20 \text{ ms}^{-1}$ (38,7%), zatim $10\text{--}15 \text{ ms}^{-1}$ (31,6%) i u 13,4% slučajeva brzina je iznosila $21\text{--}25 \text{ ms}^{-1}$, a preovlađujući smjer jest 280° (17,9%), zatim vjetar iz smjera 260° (15,4%), a u 8,9% slučajeva javio se vjetar iz smjera 270° . Iz rezultata analize na toj izobarnoj plohi slijedi daljnje skretanje vjetra udesno, ali se vidi da ono nije veliko.

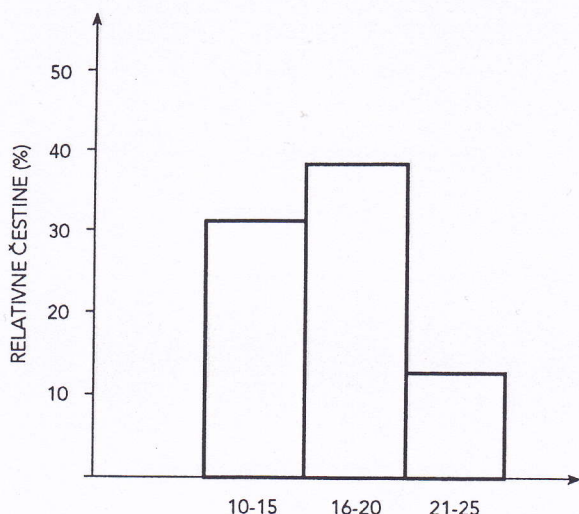
Na toj plohi promatrane su i tri grupe podataka uz sljedeće kriterije: u prvoj je grupi vjetar brzine $\geq 10 \text{ ms}^{-1}$, u drugoj $\geq 20 \text{ ms}^{-1}$ i u trećoj $\geq 30 \text{ ms}^{-1}$. Ispunjenje kriterija u prvoj grupi podataka jest 95,7%, u drugoj 44,4%, a u trećoj 14,2%. U sva tri



Slika 4. Prevladavajući smjer jakog vjetra na plohi 700 hPa iznad Zagreba u razdoblju prosinac 1978—travanj 1979.

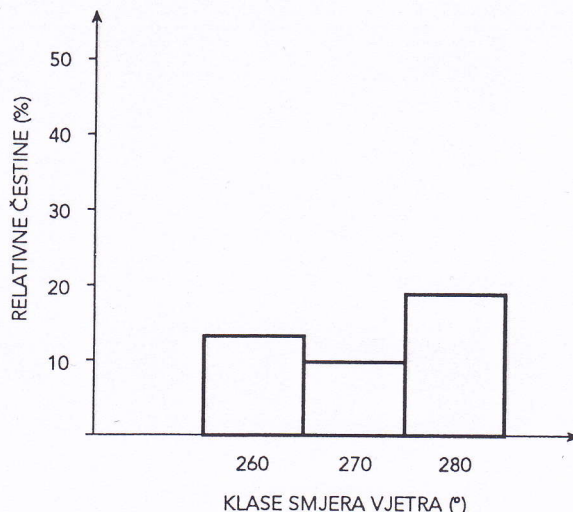
Figure 4. Prevailing strong wind direction at the 700 hPa above Zagreb in the period December 1978—April 1979.

slučaja najčešće se javljao vjetar iz smjera 280° s različitim postotkom zastupljenosti, uz konstataciju da što je brzina veća, postotak zastupljenosti preovlađujućeg smjera jest veći, dok se kolebanja ostalih smjerova smanjuju.



Slika 5. Brzina jakog vjetra na plohi 500 hPa iznad Zagreba u razdoblju prosinac 1978—travanj 1979.

Figure 5. Strong wind speed at the 500 hPa above Zagreb in the period December 1978—April 1979.



Slika 6. Prevladavajući smjer jakog vjetra na plohi 500 hPa iznad Zagreba u razdoblju prosinac 1978—travanj 1979.

Figure 6. Prevailing strong wind direction at the 500 hPa above Zagreb in the period December 1978—April 1979.

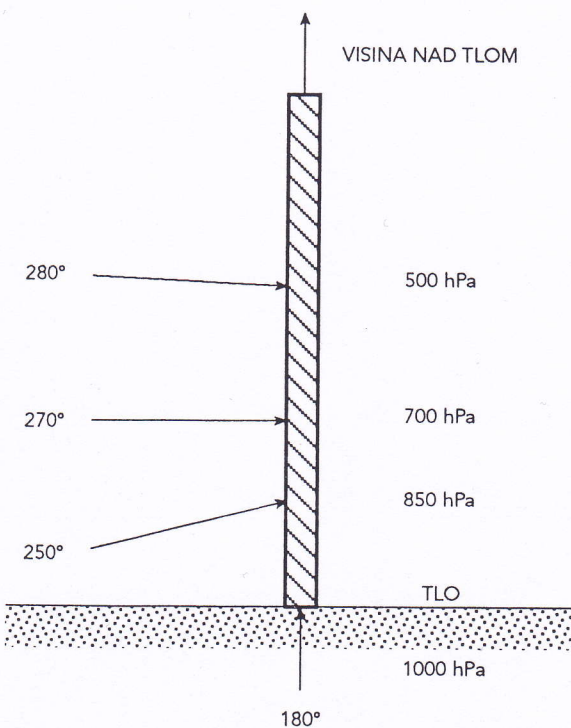
Promatrajući sva tri slučaja može se utvrditi skretanje jakog vjetra visinom i to može vojnim pilotima poslužiti kao dobra informacija.

3.2. Mlazna struja

U gornjim slojevima troposfere, najčešće neposredno ispod tropopauze, te u nižim slojevima stratosfere nailazi se na veoma velike brzine vjetra. Ta pojava s minimalnom brzinom vjetra od 30 ms^{-1} naziva se mlazna struja (jet stream). Osobine su joj: duljina nekoliko tisuća kilometara, širina nekoliko stotina kilometara, najčešće je na visini 8–12 km, ima najčešće jedan, a ponekad i više maksimuma brzine – to je os mlazne struje, vertikalno smicanje vjetra jest $5\text{--}10 \text{ ms}^{-1}$ na 100 m, a bočno smicanje jest oko 5 ms^{-1} na 100 m.

Detaljnija proučavanja troposferskih mlaznih struja datiraju od kraja drugog svjetskog rata, a stratosferske i pogotovo mlazne struje viših slojeva atmosfere ni do danas nisu dovoljno istražene.

Postoji nekoliko tipova troposferske mlazne struje: arktička, umjerenih širina i subtropska. Arktička se javlja zimi u arktičkom pojasu, vezana je uz arktičku frontu, stalnog je smjera, a često se poveže s mlaznom strujom umjerenih širina. Nalazi se na visini 6–8 km i u pojasu od 70° do 80° sjeverne geografske širine. Mlazna struja umjerenih širina javlja se u pojasu 45° do 65° sjeverne geografske



Slika 7. Srednje skretanje jakog vjetra visinom hPa iznad Zagreba u razdoblju prosinac 1978—travanj 1979.

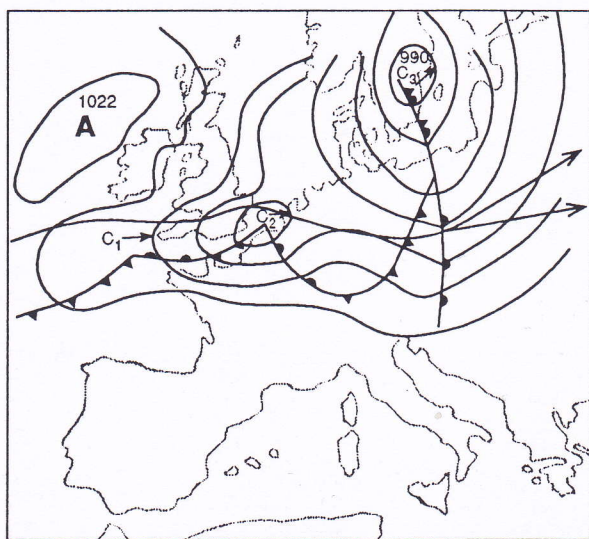
Figure 7. Average change in wind direction with height above Zagreb in the period December 1978—April 1979.

širine, najčešće na visini 8–10 km zimi i 9–11 km ljeti, vezana je uz polarne fronte, a najrazvijenija je u hladnom dijelu godine. Karakterizira je velika pokretljivost, a pored zonalnog smjera (od zapada prema istoku), koji je i najčešći, može poprimiti čak i meridionalni (od sjevera prema jugu). Ponekad se može javiti i oko cijele Zemlje. Ukoliko je njeno pomicanje prema jugu izraženije, može se spojiti sa subtropskom mlaznom strujom. Suptropska mlazna struja susreće se u području Sredozemlja, Bliskog istoka, Indije. Dosta je stabilna po lokaciji, a ljeti je malo pomaknuta prema sjeveru (Zverev, 1977; Dobrilović, 1960).

Mlazna struja umjerenih širina i arktička mlazna struja nazivaju se još i frontalnima, zbog njihove povezanosti s frontama.

Kod ciklone u razvoju (C_1) mlazna struja jest sjeverno od ciklone, u području hladnog zraka, dok je kod mlade ciklone (C_2) neposredno iznad centra ciklone, nešto povijena prema sjeveru. Kod okludirane ciklone (C_3) mlazna struja zalazi u topli sektor, povija se prema jugu i dijeli na dva dijela, što uvjetuje slabljenje mlazne struje. Ona sadrži velike količine kinetičke energije, što je posebno važno za sinoptičke procese, te joj se pri analizi posvećuje velika pažnja. Treba naglasiti da u drugim slučajevima položaj mlazne struje u odnosu na ciklone može odstupati od prikazanog.

Prvo pitanje koje je tražilo odgovor bilo je: kolik je maksimalni vjetar u mlaznoj struji iznad proma-



Slika 8. Položaj mlazne struje i niz fronti (11.4.1956.)

Figure 8. Jet stream position and the series of fronts (11 April 1956).

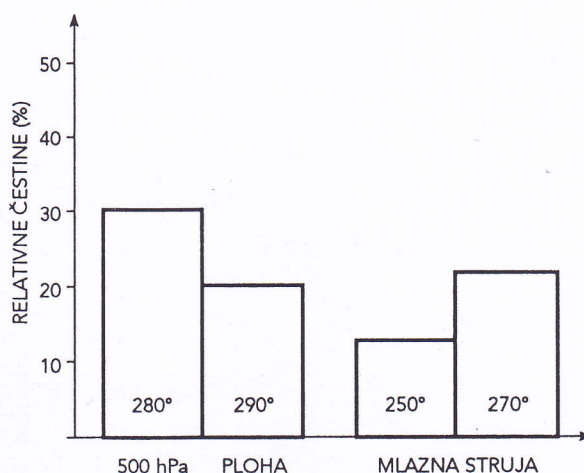
tranog područja, odnosno kolika je brzina vjetra u osi struje. Dobiveni dijapazon brzina dosta je širok – od 30 ms^{-1} do 80 ms^{-1} ($100\text{--}290 \text{ kmh}^{-1}$).

Drugo pitanje odnosilo se na smjer puhanja vjetra u osi mlazne struje. Istraživanja su pokazala da je u 21,9% registriran vjetar iz smjera 270° , u 12,2% iz smjera 250° i 300° , a u 9,8% iz smjera 210° . Ako se usporede ti rezultati s rezultatima analize na izobarnoj plohi 500 hPa i jačinom vjetra od 30 ms^{-1} (a to nije ništa drugo već mlazna struja na toj plohi), vidi se da ne postoji bitno podudaranje smjera vjetra.

Treće pitanje jest postoji li tendencija mlazne struje prema nekoj određenoj izobarnoj plohi. Na osnovu pažljive analize zaključeno je da ne postoji, jer bi postotak zastupljenosti neke visine ili dijapazona visina morao biti veći.

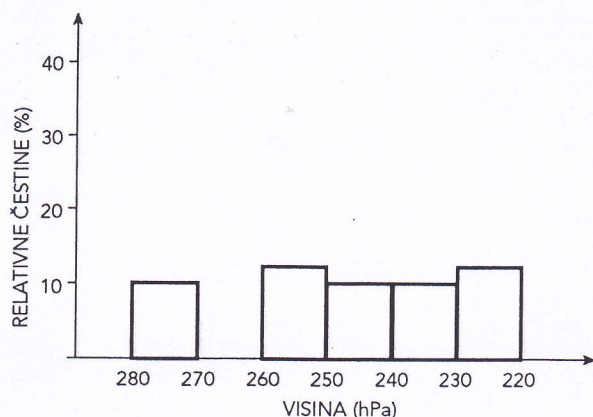
Brzina vjetra u osi mlazne struje iznad promatranog područja kreće se od 100 do 200 kmh^{-1} i javlja se pretežno iz zapadnog smjera, s relativno malim postotkom zastupljenosti ostalih smjerova. Kada se radi o visini na kojoj se najčešće javlja mlazna struja, to je visina $260\text{--}250 \text{ hPa}$ i $230\text{--}220 \text{ hPa}$, a u 10,2% zabilježene su visine $280\text{--}270$ i 250 i 230 hPa , dok ostalim visinama pripada mnogo manji postotak. Da sumiramo: iznad promatranog područja mlazna struja javljala se u datom periodu na visini $9,5$ do $11,2 \text{ km}$.

Sljedeće je pitanje bilo: kolik je tlak zraka u pri-



Slika 9. Smjer vjetra na plohi 500 hPa i u mlaznoj struji iznad Zagreba u razdoblju prosinac 1978—travanj 1979.

Figure 9. Wind direction at the 500 hPa and in the jet stream above Zagreb in the period December 1978—April 1979.



Slika 10. Visina mlazne struje iznad Zagreba u razdoblju prosinac 1978—travanj 1979.

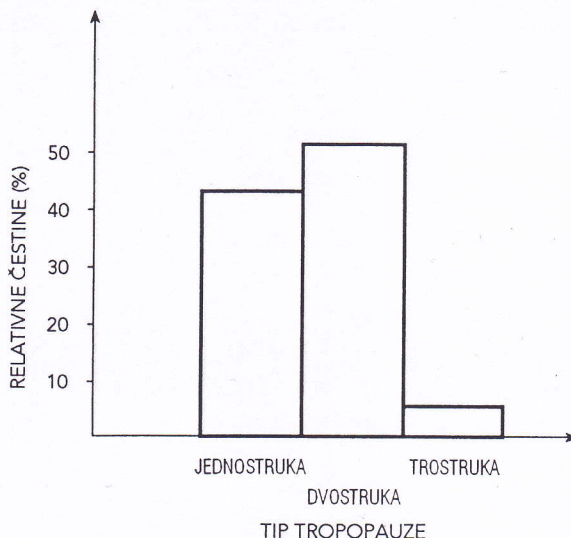
Figure 10. Jet stream altitude above Zagreb in the period December 1978—April 1979.

zemlju kada na visini egzistira mlazna struja, je li on varijabilan ili postoji tendencija prema nekoj vrijednosti. Analiza je pokazala da je on gotovo po pravilu između 995 i 1000 hPa u promatranom području, dakle relativno nizak.

I još jedno pitanje: što se dešava s prizemnim vjetrom kada se na visini pojavi mlazna struja i postoji li veza između fenskog vjetra u prizemlju i mlazne struje na visini. Odgovor je da pojava mlazne struje na visini ne uvjetuje redovitu pojavu fenskog vjetra u prizemlju, odnosno da se fenski vjetar može javiti iako iznad promatranog područja nije registrirana pojava mlazne struje. O povezanosti mlazne struje i prizemnog fenskog vjetra dobiveni su sljedeći rezultati: u 28,6% mlazna struja jest registrirana, a zabilježen je i fenski vjetar; u 10,0% mlazna struja brzine $30\text{--}50\text{ ms}^{-1}$, u tri slučaja i $60\text{--}80\text{ ms}^{-1}$ jest postojala, ali fenski vjetar nije, dok u 32,9% mlazna struja nije registrirana, ali fenski vjetar brzine $11\text{--}20\text{ ms}^{-1}$ jest. Iz toga se može zaključiti da je fenski vjetar, a u promatranom području on je južnog i jugozapadnog smjera (to je obrađeno u posebnom radu istog autora), vezan isključivo uz ciklone i frontalne poremećaje.

3.3. Tropopauza

U vezi s tropopauzom zanimljivo pitanje bilo je: koliko se često u tom području pojavljuje jednostruka, a koliko često višestruka tropopauza i na kojoj visini. Analiza je pokazala da se jednostruka

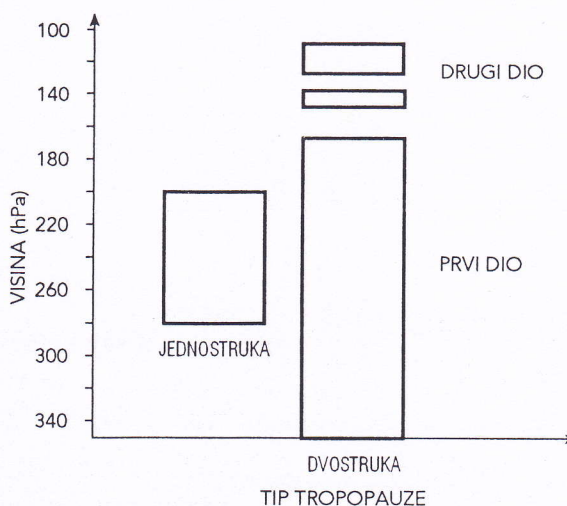


Slika 11. Zastupljenost tipova tropopauze iznad Zagreba u razdoblju prosinac 1978—travanj 1979.

Figure 11. Tropopause type occurrence above Zagreb in the period December 1978—April 1979.

tropopauza javlja u 44,4%, dvostruka u 51,3%, a trostruka veoma rijetko.

Iznad promatranog područja jednostruka tropopauza pojavljuje se na visini od 280 do 200 hPa (9,5–12 km), a kod dvostruke prva se pojavljuje na visini od 350 do 170 hPa (8–13 km) – pokazujući veoma velike oscilacije i niti jedna visina nije primarna, dok je druga na visini od 130 do 110 hPa (14,5–15,5 km) i od 150 do 140 hPa u 21,2%



Slika 12. Visine na kojima se javlja tropopauza iznad Zagreba u razdoblju prosinac 1978—travanj 1979.

Figure 12. Tropopause altitudes above Zagreb in the period December 1978—April 1979.

slučajeva. Iz analize udaljenosti između prvog i drugog dijela dvostruke tropopauze, zaključuje se da ta udaljenost nije konstantna i iznosi 50 do 160 hPa.

4. ZAKLJUČAK

Analiza skretanja jakog vjetra visinom na plohi 850, 700 i 500 hPa pokazala je da vjetar visinom skreće uglavnom prema zapadnom smjeru i da je do izobarne plohe 700 hPa brzina $10\text{--}15\text{ ms}^{-1}$, a na 700 hPa povećava se na $16\text{--}20\text{ ms}^{-1}$. U mirnodopskim uvjetima kada nema podataka radiosondaže, a da ne govorimo o ratnim uvjetima, ti su rezultati veoma važni za vojno zrakoplovstvo.

Mlazna struja iznad promatranog područja javlja se na visini od 9,5 do 11,2 km, pretežno sa zapadnim smjerom vjetra. Nije utvrđena veza između njene pojave i fenskog vjetra u zapadnom dijelu Bosne i Hercegovine.

Visina na kojoj se pojavljuje tropopauza iznad promatranog područja pokazuje da je to visina 9,5–12 km, ali je velika učestalost pojavljivanja dvostruke tropopauze veoma zanimljiva, budući da u tolikom postotku ono nije očekivano. Dobiveni rezultati mogu pomoći pri planiranju letova zrakoplova.

ZAHVALE

Zahvaljujem posebno dr. Kreši Pandžiću na veoma korisnim savjetima pri realizaciji ovog rada, te urednici mr. Janji Milković.

5. LITERATURA

- Čadež M., 1964: Vreme u Jugoslaviji, *Rasprave* 4.
- Čobanov Z., 1976: Utjecaj i prognoza meteoroloških faktora u vazдушnom saobraćaju, Beograd.
- Dobrilović P., 1960: Visinsko strujanje iznad Jugoslavije i prizemni karakteristični vjetrovi, Beograd.
- Komanda RV i PVO, 1963: Metodika analize i prognoze vremena po odsječnoj sinoptičkoj karti, Beograd.
- Komanda RV i PVO, 1976: Utjecaj meteoroloških uslova na borbena dejstva avijacije, Beograd.
- Komanda RV i PVO, 1978: Osnovne vazduhoplovno – klimatološke karakteristike SFRJ, Beograd.
- Lalić D., i Ž. Radinović, 1959: Ciklonska aktivnost u zapadnom Sredozemlju, Beograd.
- Radinović D., 1969: Analiza vremena, Beograd.
- Visoka komandno – štabna škola RV i PVO, 1971: Vazduhoplovna vojna geografija, Beograd.
- Zverev A., 1977: Sinoptičeskaja meteorologija, Leninograd.