

Mezoeffekti orografije na povećanje i razdiobu konvektivne oborine na području Zagreba

Mesoscale Effects of Orography on Enhancement and Distribution of Convective Rainfall in the Zagreb Area

VESNA JURČEC

Republički hidrometeorološki zavod SRH, Zagreb

Sažetak: Prikazana je mezoanaliza sinoptičke situacije 6—9 lipnja 1979. i proučavani uzroci razdiobe oborine koja se, nasuprot srednjoj razdiobi za taj mjesec, javlja u nizini. Pokazano je da u uvjetno nestabilnoj atmosferi presudnu ulogu za jačanje konvekcije ima: 1. povećanje vlage u prizemnom graničnom sloju **nakon** prolaza »pseudo-fronte« karakterizirane naglim povećanjem ekvivalentne potencijalne temperature, i 2. prizemna konvergencija, uvjetovana modifikacijom strujanja uslijed orografskih efekata.

Uvjeti za gibanje zračne mase oko ili preko planine, izraženi internim Froudovim brojem, ukazuju na tendenciju obilaženja struje oko planinske prepreke, kako u promatranj situaciji tako i u normalnom stanju atmosfere za lipanj.

Ključne riječi: mezoanaliza, orografski efekti, razdioba oborine, konvekcija, stabilnost atmosfere, Zagreb.

Abstract: Mesoscale analysis of a case study 6—9 June 1979 is presented, and causes of rainfall distribution are studied, which, contrary to the mean distribution for this month, appears at the foot of the mountain. It is shown that in a conditionally unstable atmosphere the principal causes for the convection development are attributed, 1. to the increase of moisture in the lower boundary layer, **after** a passage of a »pseudo-front« characterized by a rapid increase of equivalent potential temperature, and 2. the surface convergence caused by modified motions due to orographic effects.

The conditions for the motions over and around the mountain, expressed by the internal Froud number, suggest a tendency for the air currents to move around the mountain in the considered situation, as well as in the June normal atmospheric state.

Key words: mesoanalysis, orographic effects, precipitation distribution, convection, atmospheric stability, Zagreb.

1. UVOD

Oborine se u gruboj klasifikaciji mogu svrstati u tri grupe: frontalne, konvektivne i orogenetske*, iako su one u realnosti često rezultat kombiniranih efekata, pa mogu sadržavati i sve tri navedene komponente.

Ispitivanje uzroka oborinskih procesa uvjetovanih orografskim efektima i sinoptičkim sistemima (tip fronte, ciklone, nestabilnost u zračnoj masi i slično) predstavlja mukotrpan rad otežan činjenicom da je održavanje potrebne guste mreže ombrografske stаницe, za utvrđivanje vremensko-prostorne varijabilnosti oborina, vrlo skupo.

* Izraz »orogenetske« uveo je u meteorološku terminologiju Bergeron (1965) umjesto uobičajenog izraza orografske oborine, s obzirom da riječ »orografija« ima deskriptivno značenje, ili opis planine, dok »orogenetski« označuje fizikalni proces uvjetovan planinskom preprekom.

Raspodjela srednje mjesečne i godišnje količine oborine pokazuje većinom visoku korelaciju s visinom terena (Bleasdale and Chan, 1972; Wilson and Atwater, 1972). To ne mora biti slučaj s višim planinskim preprekama, gdje uzlazna struja vlažnog zraka može uvjetovati maksimalne količine oborine na navjetrini planine. Raspodjela oborina u kraćim vremenskim intervalima strogo ovisi o sinoptičkoj situaciji i interakcijama mezosistema, uvjetovanih topografskim uvjetima u lokalnim razmjerima, i sistema sinoptičkih razmjera.

Nicholass i Harrold (1975) su ispitivali ovisnost orogenetske oborine o prizemnom smjeru vjetera i sinoptičkim sistemima na brdovitom području Engleske, i računali omjer količine oborine u pojedinoj regiji i odgovarajuće ukupne oborine na cijelom području. Klimatološka statistika ovog omjera se pokazala koris-

nom za prognozu oborine u pojedinim regijama, dok je točnost prognoze u mezorazmjerima ovisila primarno o točnosti prognoze ukupne oborine nad cijelim područjem.

Vrlo detaljna studija raspodjele oborine u malim razmjerima potječe od Bergerona (1960, 1965, 1967). Istraživanja za vrijeme poznatog projekta PLUVIUS na relativno ravnom terenu Uppsale u Švedskoj pokazuju jasnu tendenciju ka povećanju oborine s porastom visine. Ovo povećanje oborine Bergeron objašnjava koncepcijskim modelom »ispiranja« i mehanizma orogenetske oborine na brdovitom području. Ovim modelom uzlazna vlažna struja iz nizine stvara »brdski« oblak uslijed kojeg na tom području jača oborina koja pada iz nekog višeg oblaka.

Kvantitativni aspekti ovoga modela prikazani su u radu Badera i Roacha (1977) i sumarnom pregledu ove problematike Browninga (1980).

Problem kvantitativne analize i prognoze oborine na našem području otežan je činjenicom da alpski kompleks uvjetuje interakcije sistema različitih razmjera, pa lokalna strujanja pod utjecajem orografije predstavljaju bitnu komponentu vjetera superponiranu na gibanje većih razmjera. Na taj način je i orogenetska komponenta sadržana u svakoj ukupnoj količini oborine bilo da se radi o frontalnoj ili konvektivnoj oborini. Sinoptičko iskustvo i analize uzroka oborine u Hrvatskoj (Penzar i Penzar, 1980, 1981) pokazuju da je većina oborina frontalnog karaktera.

Analiza ovisnosti mjesečne količine oborine na području Zagreba s makrovremenskom situacijom na području Evrope i istočnog dijela Atlantika (Jurčec i Papišta, 1978) pokazuju da su oborine u hladno doba godine u relativno visokoj korelaciji s nekim od kvazi-stacionarnih centara u donjoj troposferi, koji diktiraju prevladavajuća strujanja a time i smjer gibanja frontalnih sistema. Međutim, u toplo doba godine su ove korelacije daleko manje, a posebno je to slučaj s oborinama u lipnju kada je zabilježen drugi maksimum oborine u Zagrebu. To se može objasniti činjenicom da su visoke količine oborina uvjetovane frontalnom konvekcijom malih razmjera, jer bi u slučaju makro-konvekcije unutar zračne mase (»hladna kaplja« u srednjoj troposferi), barem relativna topografija pokazivala veću korelaciju s oborinom. Gajić—Čapka (1982) je u iscrpnoj analizi uzroka lipanjskog maksimuma oborina potvrdila ovu pretpostavku i pokazala da su najveće čestine pojava oborine povezane s frontalnim sistemima koji dolaze na područje sjeverne Hrvatske sa sjeverozapada.

Osnovni problem u proučavanju orogenetskih utjecaja na oborinski režim u području Alpa je ispitivanje uvjeta pod kojim dio zračne mase prelazi preko Alpa a drugi dio ih obilazi. Dobro poznati, iako nedovoljno istraženi fenomen u tom području je zaustavljanje i gomilanje hladnog i vlažnog zraka sjeverno od Alpa, tzv. efekt blokiranja, povezan s anomalijama prizemnog polja tlaka. Ove anomalije tlaka, a ne sama prepreka, uvjetuju otklon struje od planine i prisiljavaju zračne mase u donjoj troposferi da se gibaju oko planine. Prolaz fronte, uz karakteristično polje temperature i vjetera, ima tendenciju jačanja blokiranja, pa na taj način jača i baroklinost prizemnog sloja atmosfere.

Za vrijeme sjeverozapadnog prodora hladnog zraka efekt blokiranja može uvjetovati da samo dio zračne

mase prelazi preko Alpa, dok značajni dio mase ostaje blokiran i usmjeren oko planine. Interakcije između frontalnih sistema i Alpa bitno ovise o režimu stabilnosti i njegovom dominirajućem obliku nad rotacijom i drugim karakteristikama gibanja u danoj situaciji.

Premda motrenja pokazuju da su gibanja iznad istočnog dijela Alpa obično vrlo kompleksna, uslijed različitih faktora i simultanih interakcija različitih procesa, relativna važnost ovih faktora bi se mogla upoznati jedino odgovarajućim izborom posebnih sinoptičkih situacija i njihovom detaljnom studijom.

Svrha je ovog rada da na jednom primjeru sinoptičke situacije prikaže utjecaj planinske cirkulacije i toplinskog efekta grada na raspodjelu oborine na širem području Zagreba. Prikazani primjer ukazuje na važnost proučavanja orografskih efekata u pojedinim sinoptičkim situacijama u cilju boljeg razumijevanja oborinskih procesa i mogućnosti njihovog uključivanja u numeričke modele za lokalnu prognozu oborine. Karakteristike strujanja ovih razmjera pripadaju kratkovalnim dužinama na kraju ljestvice mezorazmjera (reda veličine manje od 10 km), ali istovremeno uključuju i proučavanja međudjelovanja dinamičkih procesa širokog spektra atmosferskih gibanja.

2. SINOPTIČKA SITUACIJA 6—9. LIPNJA 1979.

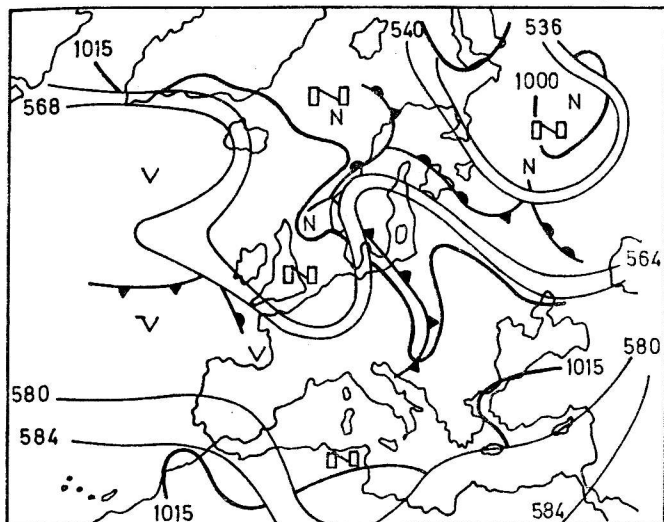
Trodimenzionalna mezoanaliza u situacijama s konvektivnim procesima otežana je činjenicom da su raspoloživi podaci radio-sondažnih mjerenja, u intervalima od 12 sati, suviše veliki. Pored toga i vrijeme radiosondažnih motrenja (00 i 12 GMT) vrlo je nepovoljno za praćenje promjena u strukturi atmosfere, koje su maksimalne upravo u međutermima kada se i pojavljuje najveća čestina frontalnih konvekcija (Gajić—Čapka, 1982).

Idealna prilika za proučavanje uzroka frontalne konvekcije bilo je razdoblje od mjesec dana (10. V—10. VI 1979) za vrijeme specijalnog perioda motrenja (SOP) prvog eksperimenta globalnog programa za istraživanje atmosfere (GARP) kada su u Zagrebu vršene 4 radiosondaže dnevno. Nažalost, vrijeme je bilo izuzetno mirno za ovo doba godine, i samo jedna fronta s izrazitom konvekcijom zahvatila je sjevernu Hrvatsku krajem toga razdoblja, koja je predmet naše studije.

Opis glavnih makrokarakteristika vremena u razdoblju SOP dan je u ranijem radu autora (Jurčec, 1980), u kojem se ističe dominirajući utjecaj evropske kvazi-stacionarne anticiklone i ciklone u sjeveroistočnom dijelu Atlantika. Plitke fronte zahvaćale su samo zapadnu Evropu do Alpa i sjeverno od njih, pa je prizemni granični sloj na tom području, relativno hladan i vlažan u odnosu na suho i toplo područje južno i istočno od Alpa.

Sl. 1 prikazuje sinoptičku situaciju od 8. VI u 00 GMT, prema kojoj se prizemna fronta nalazi nad našim područjem. Srednju troposferu karakterizira greben nad srednjom Evropom i plitka ciklona nad Velikom Britanijom, s dolinom usmjerenom prema Alpama. Vrlo mali gradijenti tlaka u donjoj troposferi vrlo

8.VI.1979, 00 GMT



Sl. 1. Sinoptička situacija 8. lipnja 1979, u 00 GMT, prikazana kombiniranim kartom prizemne, s frontama i izobarama 1000 i 1015 mb, i visinske karte na 500 mb, kojom odabrane izohipse označuju osnovno geostrofičko strujanje s malim gradijentima nad srednjom i južnom Evropom. Otvoreni N označuje centar niskoga tlaka na visini, a tanki N i V označuju niski i visoki tlak pri tlu.

Fig. 1. The synoptic situation on 8 June 1979 at 00 GMT, presented by composite chart at the surface, with fronts and isobars of 1000 and 1015 mb, and at 500 mb, indicating basic geostrophic flow, by selected isophyses, and small gradients of geopotential in middle and southern Europe. The open Ns indicate centers of upper level low, and thin Ns and Vs indicate low and high pressure centers at the surface.

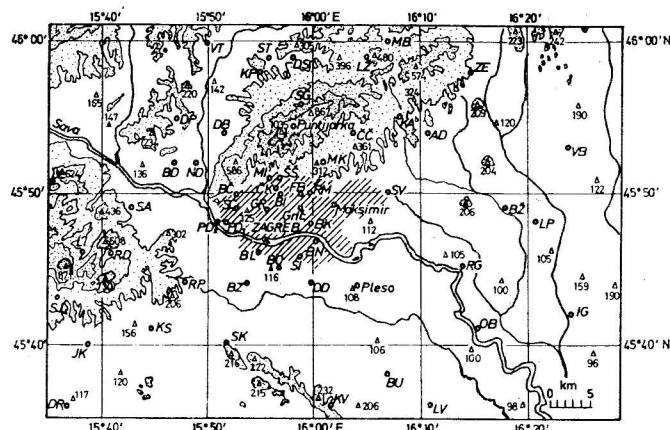
su povoljni za razvoj lokalnih cirkulacija, a prodor vlažnog zraka u prizemnom sloju pruža mogućnost za razvoj lokalne konvekcije.

Položaj fronte na sl. 1 uglavnom prati usku dolinu u polju prizemnog tlaka izraženu konfiguracijom 1015 mb izobare. Kasnije ćemo vidjeti da je ova fronta zahvatila naše područje u poslijepodnevni satima 7-og.

3. KARAKTERISTIKE ZAGREBAČKOG PODRUČJA

Šire područje Zagreba koje će se ovdje promatrati iznosi 50×70 km, i prikazano je na sl. 2. Planina Medvednica je smještena u smjeru SW — NE, s najvišim vrhom od 1035 m. Zapadno od Zagreba je smješteno Žumberačko gorje, a na jugu Vukomeričke gorice, s vrhovima brda nešto višim od 200 m.

Sjeverno od zagrebačkog područja smještena je Ivanščica, s vrhom od 1061 m, približno u smjeru istok — zapad, a još istočnije se nastavlja na Kalnik s vrhom od 643 m. Između Medvednice i Ivanščice najniže područje u Hrvatskom zagorju je dolina rijeke Krapine, koja podliježe kanalnim efektima strujanja. Ovi efekti su naročito izraženi na zapadnom području Medvednice do ušća Krapine u Savu u blizini Podsuseda (PD). Područje jugoistočno od Medvednice otvoreno je prema Panonskoj nizini za istočna i sjeveroistočna strujanja, a orografski efekti Bilogore mogu noću pojačati ova strujanja.



Sl. 2. Područje Zagreba s topografijom i smještajem kišomjernih stanica, označenih kraticama, i opservatorijima Zagreb — Grič, Maksimir i Puntijarka, i aerodrom Pleso.

Fig. 2. The Zagreb area with topography and positions of rainfall stations, indicated by letters, and the observatories Zagreb — Grič, Maksimir, Puntijarka and Pleso Airport.

Srednja mjesečna raspodjela oborine u lipnju, kao i u ostalim mjesecima, pokazuje porast oborine s visinom (vidi rad Gajić—Čapka u ovoj publikaciji), što bi sugeriralo da se na raspodjelu oborina u ovom području može primijeniti Bergeronov model ispiranja. Međutim, ako na stvaranje brdskog oblaka djeluje uzlazna komponenta planinskog vjetera, ona djeluje samo danju, dok je noću planinski vjetar usmjeren niz obronke.

To znači da bi noćna planinska cirkulacija, pri kojoj je planinski vjetar usmjeren niz obronke, mogla pojačati prizemnu konvergenciju u dolinama i uvjetovati obrnutu raspodjelu oborine od srednjaka.

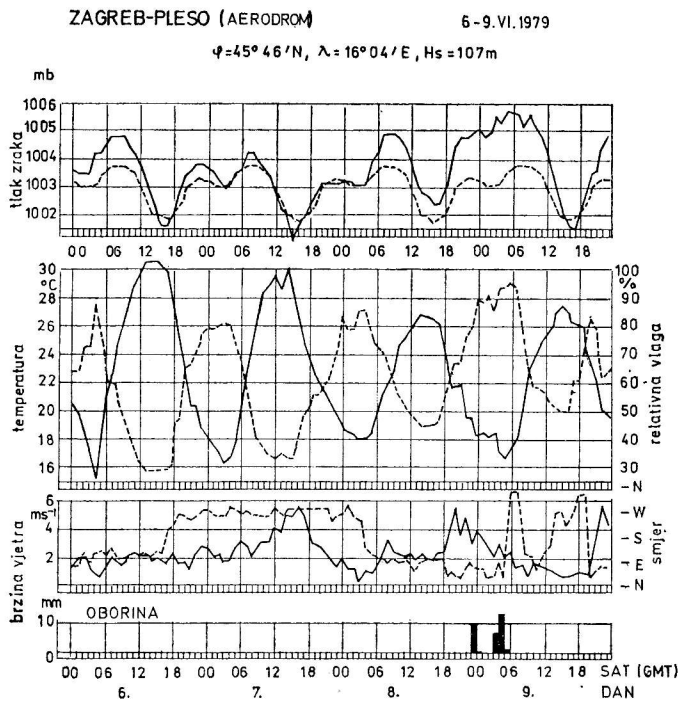
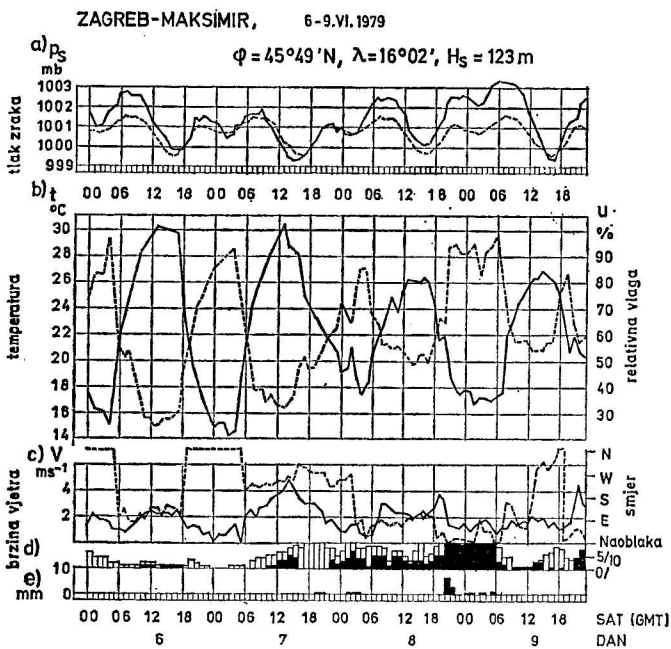
Upravo ovakova raspodjela oborine je predmet naše studije u slijedećem poglavlju.

4. MEZOANALIZA

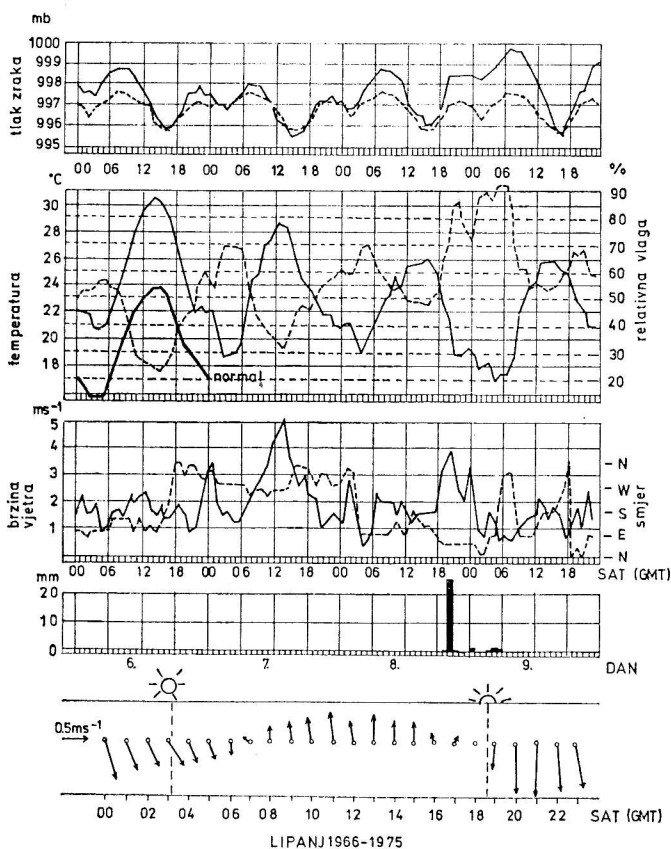
U ovom poglavlju pratit ćemo dnevne hodove meteoroloških elemenata na opservatorijima Puntijarka, Zagreb—Grič, Zagreb—Maksimir i aerodrom Zagreb—Pleso (sl. 3), prikazat ćemo razdiobu 24-satne količine oborine 8—9. lipnja (sl. 4), i pokazati kako razdioba vjetera na području sjeverozapadne Hrvatske (sl. 5) može objasniti pojavu intenzivne konvekcije kao posljedice prizemnih konvergentnih strujanja.

Dnevni hodovi tlaka zraka na sl. 3 prikazuju stanični tlak u odnosu na srednje dnevne hodove tih stanica za lipanj 1979. Na tim dijagramima je karakteristična veća dnevna amplituda tlaka u promatranom razdoblju u odnosu na srednju, što ukazuje na izraženu dnevnu cirkulaciju.

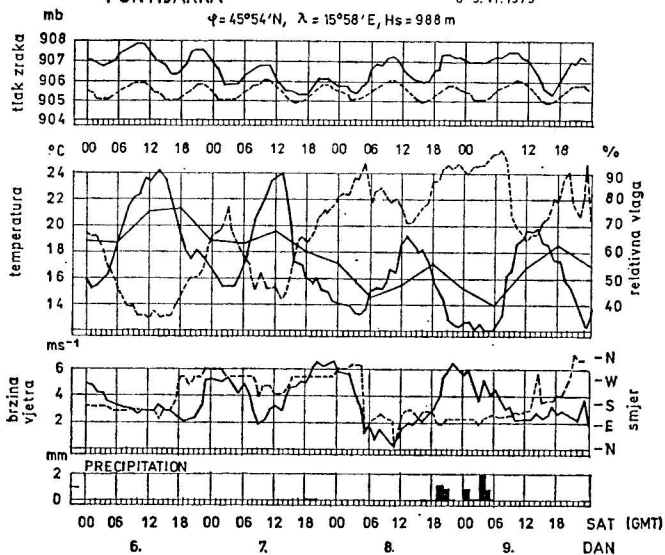
Na grafikonu temperature za Grič prikazan je i srednji dnevni hod temperature za lipanj, pa je očito da je u cijelom promatranom razdoblju temperatura bila viša od normalne. Sve stanice pokazuju veliku dnevnu amplitudu temperature prvog dana, i smanjenje amplitude uz pad temperature slijedećeg dana. Porast minimalnih temperatura u Maksimiru i na Plesu



ZAGREB-GRIČ 6-9.VI.1979
 $\varphi = 45^{\circ}49' N, \lambda = 15^{\circ}59' E, H_s = 159 m$



PUNTIJARKA 6-9.VI.1979
 $\varphi = 45^{\circ}54' N, \lambda = 15^{\circ}58' E, H_s = 988 m$



Sl. 3. Satne vrijednosti: a) tlaka zraka na nivou stanice superponirane na srednji dnevni hod za lipanj 1979. (crtkane linije), b) temperature (pune linije) i relativne vlage (crtkane linije), c) vjetra (brzina punim, a smjer crtkanim linijama), d) oborine. Na grafikonu Maksimira prikazana je naoblaka u desetinama. Prazni stupci označuju ukupnu naoblaku, a ispunjeni količinu niskih oblaka. Točkaste linije uz temperaturu Puntijarke prikazuju temperaturu na 1000 m iz radiosondaže Zagreb — Maksimir. Na grafikonu Griča je normalni hod temperature 1931—60 i srednje satne vrijednosti vektora vjetra 1966—75.

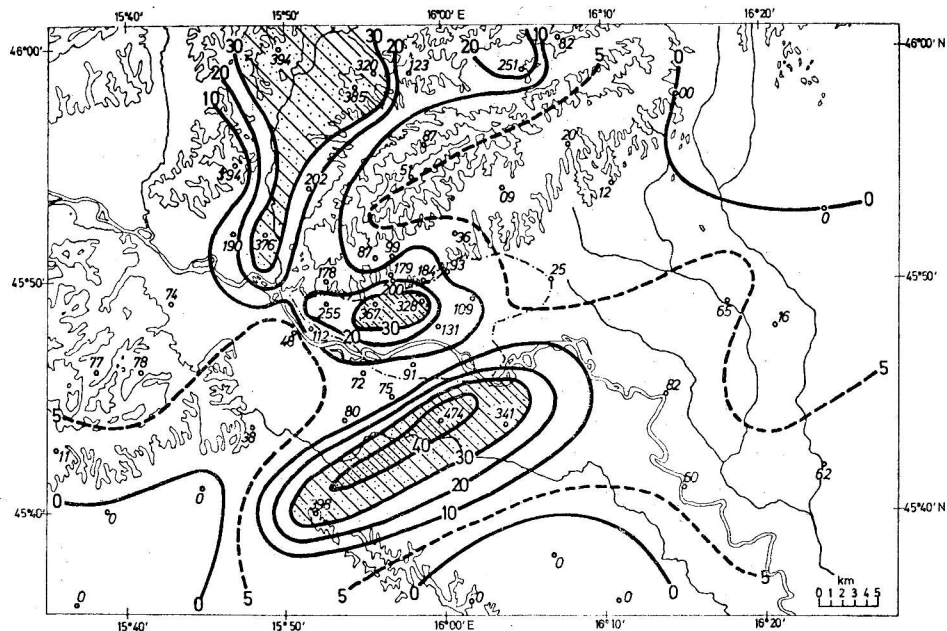
rezultat su razaranja prizemne inverzije, što ćemo prati ti na sl. 6.

Pad temperature je uz porast relativne vlage, jače izražen na Puntijarki. Povećana naoblaka, koju prati mo na grafikonu Maksimira, i maksimalne brzine vjetra i pad tlaka, pored pada temperature pokazuje da je frontalni sistem sa sl. 1 zahvatio ovo područje u poslijepodnevni m satima 7-og. Fronta je uvjetovala samo slabu kišu na Puntijarki i Maksimiru.

Fig. 3. Mean hourly values: a) station's air pressure superimposed on mean daily course for June 1979 (dashed lines), b) temperature (solid lines) and relative humidity (dashed lines), c) wind (speed with solid lines, and direction with dashed lines), d) precipitation. The graph of Maksimir shows cloudiness in tenths. Empty columns indicate total cloudiness, and the filled ones present the amount of low clouds. Dotted lines following Puntijarka temperature indicate the free air temperature at 1000 m from radiosounding Zagreb — Maksimir. On the graph of Zagreb — Grič the normal daily course of temperature 1931—60 is shown and the mean hourly values of wind vectors 1966—75.

Sl. 4. Razdioba 24-satne količine oborine 8—9. lipnja 1979, 06 GMT. Vrijednosti na stanicama su ispisane u decimali bez točke, a izohijete su izvučene i označene u cijelim milimetrima.

Fig. 4. Distribution of 24-hr rainfall amount 8—9 June 1979, 06 GMT. Station's values are written in decimals without dots, and isohyets are drawn in full millimeters.

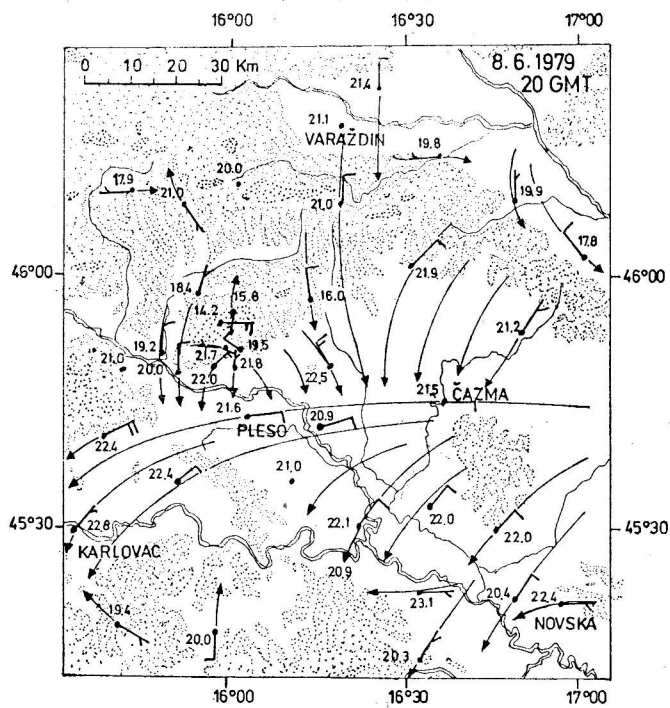


Već ova analiza ukazuje na veliku prostornu varijabilnost oborine koja naročito dolazi do izražaja u raspodjeli ukupne 24-satne količine prikazane na sl. 4. Na ovoj slici su jasno izražena tri maksimuma oborine. Objašnjenje uzroka ovih maksimuma je glavni cilj našeg rada.

Prema opisu vremena na kišomjernim stanicama maksimum sjeverno i zapadno od Medvednice potječe od intenzivne konvekcije u ranim večernjim satima. Ovaj maksimum predstavlja izraziti primjer lokalne konvekcije uslijed konvergentnih strujanja u dolini pojačanih kanalnim efektima strujanja, kao što je diskutirano u poglavlju 3. Planinski vjetar, koji u to vrijeme mijenja smjer i struji niz planinu, ovdje je pojačan istočnim strujanjem u većim razmjerima, kao što su pokazali podaci vjetra na Puntijarki. Dok ovo istočno strujanje jača planinsku komponentu vjetra na zapadnoj (zavjetrinskoj) strani Medvednice, na istočnoj (navjetrinskoj) strani se uzlazna komponenta vjetra superponira na planinski vjetar suprotnog (zapadnog) smjera, pa je rezultatni vjetar slab. Pored toga u stabilnim uvjetima, koje ćemo kasnije detaljno razmatrati, na navjetrinskoj strani dolazi do razdvajanja struje koja obilazi planinu u dvije grane sjeverno i južno od planine. Na taj način u navjetrini prevladava divergencija vjetra, što predstavlja glavni razlog da na istočnom području Medvednice nije bilo oborina, a na jugoistočnoj strani su bile vrlo slabe.

Drugi maksimum oborina se javlja nad zapadnim dijelom grada. Ova pojava je posebno interesantna jer povećanu oborinu u tom dijelu grada nalazimo i na srednjoj mjesečnoj raspodjeli oborina (sl. 3.3 u radu Gajić—Čapka u ovoj publikaciji). Uzroci ovog maksimuma, koji potječe od jedne intenzivne konvektivne čelije (praćene na grafikonu Griča, sl. 3), bi se mogli pripisati različitim efektima. Iz analiza prikazanih u ovom radu može se pretpostaviti da su za ovaj maksimum bitna tri efekta:

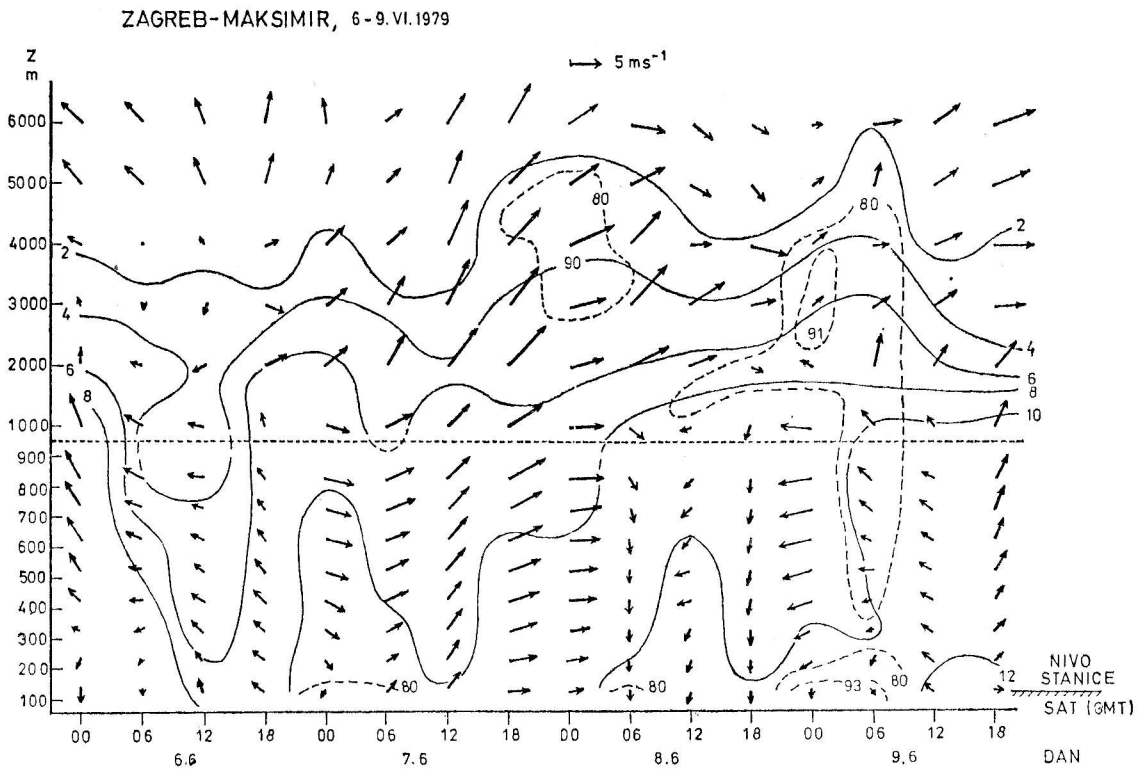
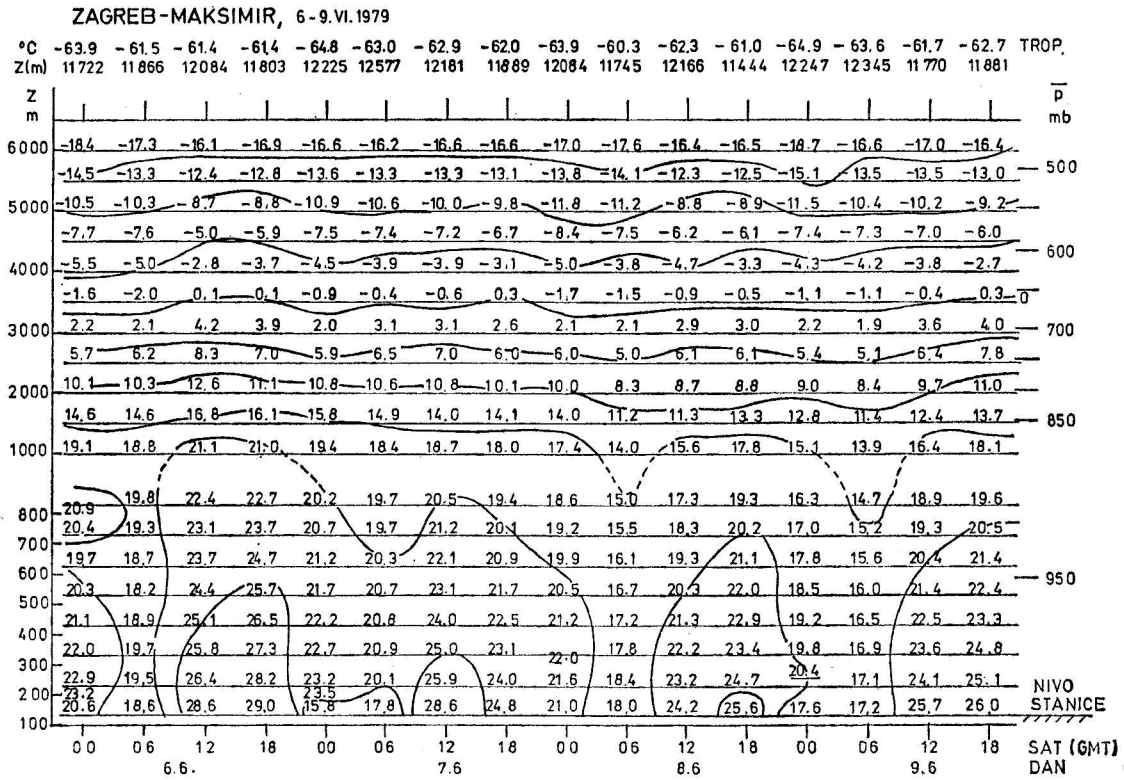
1. Razdvajanje strujanja u navjetrini Medvednice, pri čemu južna grana sa E — NE strujanjem u zapadnom dijelu grada, nailazi na N — NW strujanje koje obilazi Medvednicu sa zapadne strane. Nad tim dije-



Sl. 5. Mezoanaliza 8. lipnja 1979, 20 GMT, na području sjeverozapadne Hrvatske. Brojkama su označene temperature i vjetar (ucrtan na uobičajeni način, kratka strelica označuje 5, a duga 10 čvorova) na klimatološkim stanicama. Strelice označuju strujnice i prikazuju liniju konvergencije južno od Medvednice.

Fig. 5. Mesoanalysis 8 June 1979, 20 GMT, at the area of north-west Croatia. Numbers indicate temperature and wind (plotted in conventional manner with short barb indicating 5, and long 10 knots) at the climatological stations. Arrows indicate streamlines and show the convergence line to the south of Medvednica.

Velike količine oborina nalazimo tek u večernjim satima slijedećeg dana, ali se njihov intenzitet i vremenska raspodjela bitno razlikuju na promatrane četiri stanice. Najintenzivnija oborina se pojavljuje na Griču, 20—21 sat GMT, na Plesu je nešto kasnije uočljiva pojava dviju intenzivnih konvektivnih čelija, dok je u Maksimiru i na Puntijarki oborina mnogo slabija.



Sl. 6. Vremenski vertikalni presjek za Zagreb — Maksimir 6—9. lipnja 1979. Gore: temperatura i izoterme, izvučene za svakih 5°C. Ordinata označuje geometrijske visine za svakih 100 m u graničnom sloju i 500 m iznad 1 km. S desne strane su označene standardne izobarne plohe koje odgovaraju srednjoj visini za cijelo razdoblje. Gornji red označuje temperaturu i visinu tropopauze. Dolje: vektori horizontalne komponente vjetera i izolnije omjera miješanja u g/kg. Crtkane linije označuju izolnije relativne vlage više od 80%.

Fig. 6. Time-height cross-section for Zagreb — Maksimir, 6—9 June 1979. Upper: temperature and isotherms drawn for each 5°C. The ordinate indicates geometric heights for each 100 m in the boundary layer and 500 m above 1 km. On the right are the standard isobaric pressure levels corresponding to the mean heights for the entire period. Upper lines indicate the temperature and heights for the tropopause. Below: Vectors of horizontal wind components and isolines of mixing ratio in g/kg. Dashed lines indicate isolines of relative humidity above 80 percent.

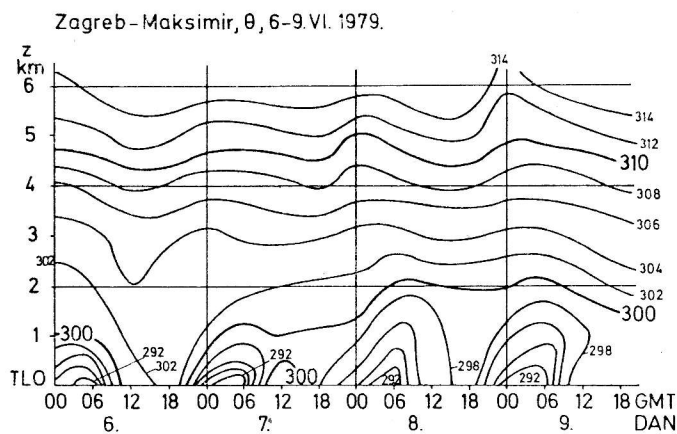
lom grada na taj način nastaje konvergencija pojačana silaznom planinskom komponentom vjetera.

2. S obzirom na jači sjeverni vjetar na zapadnom podnožju Medvednice, i naglo slabljenje ove komponente prema istoku, nad gradom se javlja ciklonalna vrtložnost.

3. Toplinska kapa grada uvjetuje smanjenje stabilnosti i povećanje uzlazne komponente gibanja, što istovremeno jača konvergenciju vjetera nad gradom.

Efekti 2. i 3. fizikalno su slični efektima pri formiranju Genovske ciklogeneze u zavjetrini Alpa, samo se u našem slučaju radi o mnogo manjim razmjerima.

Iako je ovaj maksimum po količini oborine nešto manji od trećeg u blizini Plesa, intenzitet oborine je ovdje veći. Time su fizikalni i dinamički procesi koji prate prestanak konvekcije također intenzivni. Oni sadrže pojačanu silaznu komponentu gibanja i divergenciju vlage pri tlu, te povećano hlađenje procesom isparavanja. To uvjetuje nagli pad temperature u odnosu na normalni dnevni hod u tom terminu, kao što se jasno vidi iz grafikona temperature za Zagreb-Grič.



Sl. 7. Izentropski vremenski vertikalni presjek 6—9. lipnja 1979. Izentropije su izvučene za svaka 2K.

Fig. 7. Isentropic time-height cross section 6—9 June 1979. Isentropes are drawn for each 2K.

Treći maksimum vrlo jasno objašnjava mezoanaliza prikazana na sl. 5. Ona prikazuje strujnice na temelju podataka vjetera na svim raspoloživim klimatološkim stanicama, uz podatke temperature, u terminu 20 GMT kada započinje pljusak na Griču. Na slici se jasno uočava planinska komponenta vjetera, jači N-vjetar u dolini Krapine zapadno od Medvednice, i NE vjetar nad gradom uslijed kojih je došlo do ranije diskutirane konvergencije. Međutim, dominantna pojava na ovoj analizi je izrazita linija konvergencije južno od Medvednice. Iz grafikona vjetera na Griču i na Plesu vidimo da nije došlo do bitne promjene smjera vjetera u toku noći sve do prestanka kiše u 06 GMT.

Iz toga se može zaključiti da je promatrana linija konvergencije glavni uzrok položaju trećeg maksimuma oborine na području Plesa.

Prikazane analize prema tome jasno pokazuju da lokalne prilike pri tlu diktiraju mjesto gdje će se

razviti konvekcija. Prizemni podaci, međutim, ne mogu objasniti opće uvjete pod kojima se razvila konvekcija, a napose ostavljaju otvoreno pitanje kontradikcije — kako se može razviti konvekcija koja zahtijeva statičku nestabilnost atmosfere s istovremenim razdvajanjem struje na planinskoj prepri koja se javlja pod stabilnim uvjetima.

Na ovo pitanje može odgovoriti samo detaljna studija vertikalne strukture atmosfere koja je predmet razmatranja u slijedećim poglavljima.

5. VREMENSKE PROMJENE VERTIKALNE STRUKTURE ATMOSFERE IZNAD ZAGREBA

Podaci i analiza temperature, vlage i vektora vjetera za četiri radiosondažna mjerenja dnevno u promatranom periodu na opservatoriju Zagreb-Maksimir dani su na sl. 6, s detaljnijim prikazom donjeg graničnog sloja do 1 km.

Granični sloj početkom perioda karakteriziraju izrazite noćne inverzije i vrlo niska vlaga prvoga dana. Postupno povećanje vlage uz jačanje vjetera i skretanje na W—SW smjer drugoga dana prate pad temperature u graničnom sloju. Ove pojave sugeriraju da je fronta koju smo pratili na prizemnim podacima plitka i difuzna, jer ne pokazuje uobičajene frontalne karakteristike iznad graničnog sloja.

Post-frontalna situacija slijedećeg dana ukazuje na daljnji porast vlage i slabljenje vjetera. U terminima 06 i 18 GMT upadljiva je N-komponenta planinskog vjetera u cijelom graničnom sloju koja iznad tla noću prelazi u ranije naglašeni istočni vjetar.

Preostaje nam važan zadatak da odredimo stabilnost atmosfere u promatranom razdoblju. Kvantitativna ocjena stabilnosti će biti prikazana u slijedećem poglavlju, a osniva se na izentropskoj analizi koju ćemo ovdje promatrati.

Sl. 7 prikazuje izentropije definirane potencijalnom temperaturom

$$\Theta = T (p_0/p)^k \quad (5.1)$$

T je temperatura u °K, p je tlak zraka, $p_0 = 1000$ mb, a $k = R/c_p$, gdje je R plinska konstanta za suhi zrak, a c_p specifična toplina kod stalnog tlaka.

Ova analiza jasno ukazuje na veću stabilnost donje troposfere iznad graničnog sloja posljednja dva dana, ali ni ona ne pokazuje znatnije promjene u strukturi srednje troposfere za vrijeme prolaza prizemne fronte.

Treba, međutim, naglasiti da ova analiza pokazuje stanje suhe atmosfere, i ne odražava promjene uslijed povećanja vlage koje smo uočili na sl. 6. S obzirom da je prisutnost vlage bitan uvjet za razvoj konvekcije, a mora se odraziti i na promjenama stabilnosti u zasićenoj atmosferi, sada ćemo promatrati karakteristike vlažne atmosfere.

Od konzervativnih veličina koje karakteriziraju zasićenu atmosferu najveću primjenu ima ekvivalentna potencijalna temperatura, Θ_e , definirana procesom u

kojem se čestica zraka diže suhoadijabatski do nivoa kondenzacije, zatim mokro-adijabatski do visine na kojoj gubi svu kondenziranu vodu, i konačno se spušta suho-adijabatski do tlaka od 1000 mb.

Definicija Θ_e , koja potječe od Rossbya, je

$$\Theta_e = \Theta_s \exp\left(\frac{mL}{c_p T}\right) \quad (5.2)$$

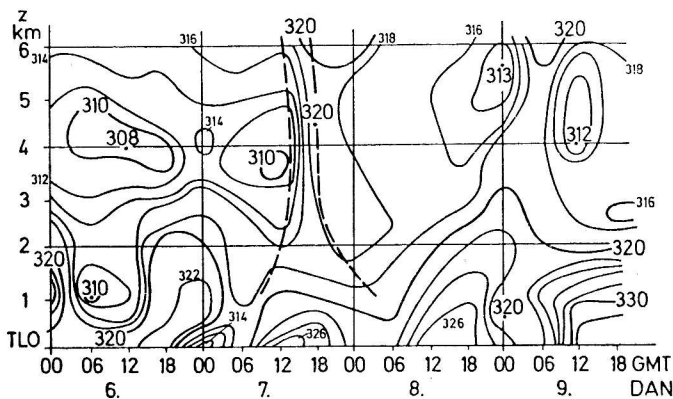
gdje je Θ_s potencijalna temperatura suhog zraka, nešto veća od Θ , definirana kao

$$\Theta_s = \Theta \left(1 + \frac{e}{p - e}\right)^k \quad (5.3)$$

Ovdje je m omjer miješanja, L latentna toplina isparavanja, a e tlak vodene pare.

Θ_e se u nekim radovima označuje i kao »pseudo-ekvivalentna« potencijalna temperatura ili ukratko pseudopotencijalna temperatura. Ona se redovno obrađuje u radiosondažnim mjerenjima za Zagreb-Maksimir, pri čemu je u (5.2) za T uvedena temperatura rosišta, T_d , a L je izražen kao funkcija T_d .

Zagreb-Maksimir, Θ_e , 6-9. VI. 1979



Sl. 8. Izentropski Θ_e — vremenski vertikalni presjek 6—9. lipnja 1979. Izentrope su izvučene za svaka 2K i ispisane su ekstremne vrijednosti. Crtkane linije označuju frontalnu zonu iznad graničnog sloja.

Fig. 8. Isentropic Θ_e — time-height cross-section 6—9 June 1979. Isentropes are drawn for each 2K and extreme values are indicated. Dashed lines represent the frontal zone above the boundary layer.

Analiza ovako definirane Θ_e prikazana je na sl. 8 i ukazuje na jedan od bitnih rezultata ove analize. Ona otkriva frontalnu zonu 7-og između 12 i 18 GMT, karakteriziranu velikim gradijentom Θ_e -izentropa, i odražava nagli porast ekvivalentne temperature na području srednje troposfere, koje je u prethodnom razdoblju, uslijed male vlage i visoke temperature, imalo vrlo niske vrijednosti Θ_e . Post-frontalno razdoblje je karakterizirano porastom Θ_e u nižim slojevima i padom u višoj troposferi, što povećava nestabilnost u odnosu na zasićeni zrak. To je značajna karakteristika termina u kojima se pojavljuje konvekcija. U prizemnom graničnom sloju primjećujemo nagle promjene Θ_e koje će se znatno odraziti na prikaz stabilnosti.

Ovdje treba naglasiti da i otkrivena fronta ima karakter »pseudo-fronte« koja prema definiciji Θ_e pokazuje da značajke vremena u novoj zračnoj masi bitno ovise o tome da li je atmosfera zasićena ili ne. U

nezasićenoj atmosferi nova zračna masa ne bi uvjetovala bitne promjene vremena, što je i razlog da naše ranije analize nisu registrirale frontu.

Prije nego prijedemo na proučavanje kvantitativne analize stabilnosti u zasićenom i nezasićenom zraku, treba napomenuti da se u praktičnoj primjeni Θ_e uobičajeno uvode mnoge aproksimacije. One mogu uvjetovati razlike u računu Θ_e i po nekoliko stupnjeva što se znatno odražava na ocjenu stabilnosti. Detaljna analiza pogrešaka u određivanju Θ_e dana je u radovima Boltona (1980) i Lippsa i Hemlera (1980).

Rezultati različitih pogrešaka u određivanju Θ_e za našu situaciju nisu ovdje prikazani jer bi to prešlo okvire samoga rada i njegovog cilja. Spomenimo, međutim, da proračun Θ_e , pri kojem bi T u (5.2) izrazili kao temperaturu na nivou kondenzacije a c_p prikazali kao funkciju vlage, pokazuje preko 1°K višu temperaturu u graničnom sloju. Uz neznatne promjene Θ_e u srednjoj troposferi, to povećava nestabilnost za vrijeme konvekcije.

6. ANALIZA STABILNOSTI ATMOSFERE

Uobičajeni parametar za ocjenu stabilnosti nezasićene atmosfere je

$$N^2 = g \frac{d(\ln \Theta)}{dz} \quad (6.1)$$

koji predstavlja Brunt-Väisälä frekvenciju i ima dimenziju sek^{-2} . g je akceleracija sile teže, a Θ je definirana relacijom (5.1). Za stabilnu atmosferu je $N^2 > 0$, za neutralnu $N^2 = 0$, a $N^2 < 0$ označava kriterij za nestabilnost.

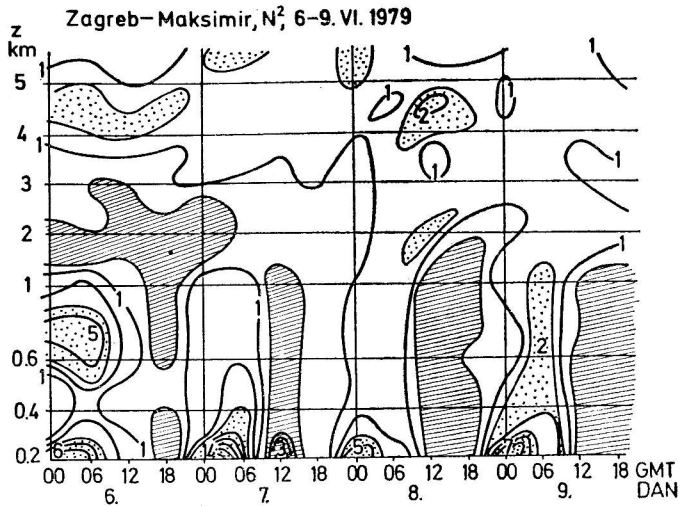
Slično se u zasićenoj atmosferi može definirati N_e^2 tako da se u (6.1) umjesto Θ uvede Θ_e . Međutim, Lallas i Einaudi (1973, 1974), i u novije vrijeme Durran i Klemp (1982) su pokazali da ovakova definicija sadrži mnogo aproksimacija. Prema ovim posljednjim autorima najveća pogreška je u pretpostavci da su vertikalni gradijenti temperature u zasićenom i nezasićenom zraku jednaki, tj. $\gamma_s = \gamma_m$, pa je točnija relacija

$$N_e^2 = g \frac{\gamma_m}{\gamma_s} \frac{d(\ln \Theta_e)}{dz} \quad (6.2)$$

Da bi izračunali stabilnost po ovoj relaciji, γ_m je određen iz Smithsonianjevih tablica (List, 1958) kao funkcija temperature i tlaka zraka. Izračunate vrijednosti ovog omjera za sve radiosondaže u našoj situaciji pokazuju da je ova veličina vrlo varijabilna, naročito u graničnom sloju, i kreće se od 0,2 prvoga dana u terminima 12 i 18 GMT, do 1,0 posljednjeg dana u 00 GMT. U sloju 2—4 km se vrijednosti omjera kreću od 0.6 do 0.9, dok je u najvišem sloju 1.0 tj. $\gamma_m = \gamma_s$.

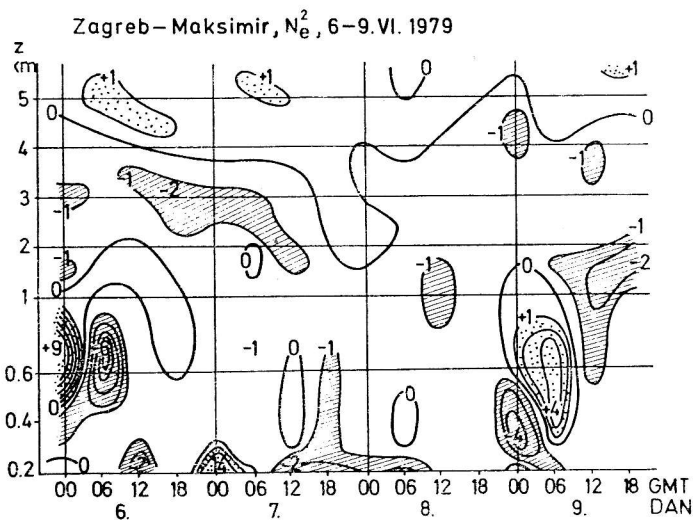
Sl. 9 i 10 prikazuju stabilnosti određene prema relacijama (6.1) i (6.2). Bitna karakteristika atmosfere prema ovim analizama je stabilnost u nezasićenom zraku i prevladavajuća nestabilnost donje troposfere za zasićeni zrak. To označuje da je donja troposfera

u promatranoj situaciji bila **uvjetno nestabilna**, tj. nestabilnost se može pojaviti samo u slučaju ako na nekom području u nekom vremenu dođe do zasićenja.



Sl. 9. Vremenski vertikalni presjek stabilnosti nezasićene atmosfere, određene relacijom (6.1) u 10^{-4} s^{-2} , 6–9 lipnja 1979. Točkice označuju najstabilnija područja ($N^2 > 1,5$), a crtice područja sa stabilnosti manjom od 0.5 jedinica. Ekstremne vrijednosti su označene brojkama.

Fig. 9. Time-height cross-section of stability for unsaturated atmosphere calculated by relation (6.1) in 10^{-4} s^{-2} , 6–9 June 1979. Dots indicate the most stable area ($N^2 > 1.5$), and shaded regions are of a minimum stability less than 0.5 units. Extreme values are indicated by numbers.



Sl. 10. Vremenski vertikalni presjek stabilnosti zasićene atmosfere određene relacijom (6.2) u 10^{-4} s^{-2} , 6–9. lipnja 1979. Najstabilnija područja su označena točkicama.

Fig. 10. Time-height cross-section of saturated atmosphere stability calculated by relation (6.2), in 10^{-4} s^{-2} , 6–9 June 1979. The most stable regions are indicated by dots.

S obzirom na poznatu veliku prostorno-vremensku varijabilnost vlage, podaci Maksimira nisu reprezentativni za šire područje Zagreba, naročito u donjem graničnom sloju. Ipak, iz prikazanih analiza mogu se izdvojiti neke osnovne karakteristike zračne mase u promatranom razdoblju.

U prvom redu mala stabilnost prvoga dana mogla je uvjetovati samo suhu konvekciju, jer je zrak bio vrlo suh.

Donja troposfera u sloju 1.5–4 km je jedino **apsolutno stabilna** (N i N_e su pozitivni) u frontalnoj zoni označenoj na sl. 8, što je vjerojatno glavni razlog za slabe oborine i obuzdavanje frontalne konvekcije. U prizemnom graničnom sloju se prolaz ove fronte odražava u povećanju uvjetne nestabilnosti kao posljedice porasta vlage.

Najznačajniji rezultat ovih analiza je izrazita uvjetna nestabilnost u dubokom sloju troposfere pred početak konvekcije. Povećana stabilnost iznad graničnog sloja na sl. 9 je u skladu s našom pretpostavkom o povoljnim uvjetima za obilazak zračne mase oko Medvednice, ali samo u slučaju da je zrak nezasićen. S druge strane dublji sloj nestabilnosti zasićene atmosfere u to vrijeme (na sl. 10) predstavlja nužan, ali ne i dovoljan uvjet za razvoj **prisilne** konvekcije. Ona, za razliku od slobodne konvekcije u zračnoj masi, zahtjeva posebne uvjete u graničnom sloju koji omogućavaju početna uzlazna gibanja za razvoj konvektivne naoblake. Iako su naše ranije analize isticalle ulogu prizemne konvergencije, sada se jasno ističe bitna uloga vlage u prizemnom graničnom sloju. Prema tome, možemo zaključiti da mjesto i vrijeme razvoja konvekcije u uvjetno nestabilnoj atmosferi dik-tira **konvergencija vlage**. Ovu veličinu možemo pomoću omjera miješanja, m , matematički izraziti kao $-\nabla \cdot m\mathbf{V}$, pa se pokazuje da je uz visoku vlagu dovoljna i slabija konvergencija vjetera da bi ovaj faktor bio jednako efektivan kao izrazita prizemna konvergencija vjetera uz malu vlagu. To pokazuje da orografski efekti, u kojima važnu ulogu igra planinska komponenta vjetera, predstavljaju odlučujuće faktore za intenzitet i raspodjelu frontalne konvektivne oborine. To drugim riječima znači da prostorno-vremenska varijabilnost ovog tipa oborine nije slučajna pojava, pa bi se prema tome mogla i prognozirati.

7. ISPITIVANJE UVJETA ZA GIBANJE PREKO I OKO PLANINE

Ovdje ćemo prikazati kvantitativnu analizu jednog parametra koji određuje uvjete za gibanje zraka oko i preko planine. To je bezdimenzionalni Froudov broj, Fi , definiran izrazom

$$Fi = \frac{V}{hN} \quad (7.1)$$

gdje je V brzina vjetera, h visina planinske prepreke, a N statička stabilnost definirana relacijom (6.1). Uv-jete gibanja oko planine određuje mala vrijednost Fi , a ona se postiže u slučaju male brzine vjetera i velike stabilnosti. Pod istim uvjetima V i N , vrijednost Fi je manja za više planinske prepreke, što odražava činjenicu da zračna masa pokazuje tendenciju prelaznja preko nižih, a obilaženje oko viših planina.

Detaljniji prikaz ove problematike prikazan je u radu Waltera i Overlanda (1982) koji su proučavali karakteristike režima vjetera u različitim sinoptičkim situacijama na području Olimpijskih Planina u SAD srednje visine $h = 1800 \text{ m}$ i širine $D = 40 \text{ km}$, pa je aspekt omjer h/D iznosio 0.045. Njihova ispitivanja su ukazala da kritična vrijednost Fi do koje zračna masa obilazi prepreku iznosi 4–5.

Mi ćemo definirati za Medvednicu približno isti aspekt omjer od 0.05, za $h = 500$ m, i $D = 10$ km, i pretpostaviti da vrijedi ista kritična vrijednost za Fi . S obzirom da temperatura u plitkom sloju uz tlo nije reprezentativna za određivanje stabilnosti šireg područja, mi ćemo iz radiosondaže Maksimira promatrati sloj 200—700 m iznad tla, tj. 328—828 m nadmorske visine.

Tabela 7.1 Srednje vrijednosti vjetra (m/s) u sloju 328—828 m, N (u $10^{-2} s^{-1}$) prema relaciji (6.1), i Fi za 6. 7. i 8. lipanj 1979 u 18 GMT i srednje vrijednosti za lipanj 1972—81 u 00 i 12 GMT za Zagreb — Maksimir

| Dan | Lipanj 1979 | | | 1972—81 | |
|------|-------------|------|------|---------|------|
| | 6. | 7. | 8. | 00 | 12 |
| GMT | 18 | 18 | 18 | 00 | 12 |
| v | 4.5 | 5.7 | 2.5 | 4.0 | 3.6 |
| N | 0.44 | 0.85 | 0.51 | 1.15 | 0.45 |
| Fi | 2.04 | 1.34 | 0.98 | 0.69 | 1.61 |

U tabeli 7.1 prikazane su srednje vrijednosti vjetra, stabilnosti za nezasićeni zrak i odgovarajuće vrijednosti Fi za tri dana u 18 sati i srednje vrijednosti za lipanj u raspoloživim terminima 00 i 12 GMT za Zagreb—Maksimir. Podaci pokazuju da je Fi pred početak konvekcije bio manji nego prethodnih dana u istom terminu i u odnosu na srednjak u 12 sati. Da bi se postigla granična vrijednost od $Fi = 4$ uz istu stabilnost vjetar bi trebao pojačati do 10.2 m/s, a maksimalni vjetar je pri vrhu graničnog sloja u slijedećem terminu (9. u 00 GMT) iznosio 5.5 m/s. U višem sloju 1—3 km Fi je bio još manji i za $h = 1$ iznosio svega 0.22. Podaci pokazuju već u srednjaku tendenciju obilaženja struje oko prepreke, naročito noću. Iznad graničnog sloja je troposfera još stabilnija, pa se može izračunati da je za srednje vrijednosti vjetra i stabilnosti u 1972—81 za sloj 1—3 km i $h = 1$ km, $Fi = 0.66$, a za sloj 3—5 km i $h = 3$ km, $Fi = 0.31$. Kao posljedica ove tendencije javlja se znatna modifikacija prizemnih frontalnih zona i jak utjecaj lokaliteta na razvoj konvektivne naoblake.

Preostaje dakako, da se u daljnjem radu na ovoj problematici ispituju uvjeti vjetra i stabilnosti na većem broju sinoptičkih situacija koje imaju sličnu razdiobu oborine kao u promatranom slučaju, i sugeriraju razdvajanje struje na navjetrini Medvednice, da bi se dobila statistika Fi i njezine točnije granične vrijednosti.

8. ZAKLJUČAK

Ispitivanje uzroka oborine u promatranjnoj sinoptičkoj situaciji pokazalo je da efekti orografije na modifikaciju vjetra imaju presudnu ulogu za intenzitet i razdiobu oborine koja se javlja u uvjetno nestabilnoj atmosferi kao posljedica razvoja post-frontalne konvekcije. Osnovni razlog za razdiobu oborine s maksimalnim količinama u nizini, za razliku od srednje mjesečne razdiobe, pripisuje se prizemnoj konvergenciji vjetra uz prisustvo visoke vlage, odnosno konvergencije vlage u donjem graničnom sloju atmosfere. Razdioba vjetra je rezultat superponiranja komponente planinske cirkulacije, koja se ovdje pojavljuje noću

kao vjetar niz planinu, i istočnog vjetra u većim razmjerima, koji u povoljnim uvjetima stabilnosti podliježe orografskim efektima razdvajanja strujnica na navjetrini planine i kanalnim efektima u kotlinama.

Iako analiza vertikalne razdiobe temperature i pojava pri tlu daje utisak da bi se uzrok oborine mogao pripisati plitkoj i difuznoj fronti, koja na području Alpa može prolaziti i nekoliko dana (WMO/ICSU, 1982), analiza ekvivalentne potencijalne temperature otkriva izrazitu troposfersku frontalnu zonu u ovom polju koju smo označili kao »pseudo-frontu«. Ova fronta se pojavljuje uz apsolutnu stabilnost troposfere iznad prizemnog graničnog sloja pa se time objašnjava sasvim slabe mjestimične oborine direktno povezane s prolazom fronte. Dolaskom nove zračne mase povećava se vlaga, a time i značaj uvjetno nestabilne atmosfere u kojoj se intenzivna oborina pojavljuje kao posljedica prisilne konvekcije pri tlu.

S obzirom da se prikazana vremensko-prostorna varijabilnost oborine pripisuje definiranim orografskim i termalnim efektima i poznatim dinamičkim procesima u mezorazmjerima, ona bi se u principu mogla prognozirati. Međutim, rezultati mezoanalize ukazuju da bi se prognoza intenziteta i raspodjele oborine u **djelomično** zasićenoj atmosferi mogla postići samo formuliranjem trodimenzionalnog multirazinskog mezo-modela, s detaljnom orografijom, koji bi uključio kompletnu termodinamiku vlažnog zraka. S obzirom da su ovakovi modeli vrlo skupi, i još se nigdje u svijetu ne koriste u operativnoj prognozi vremena, nužno je barem formulirati parametre koji se mogu dobiti iz prognoze »suhih« modela, a zatim ih modificirati karakterističnim veličinama vlažnog zraka.

Jedan od takovih parametara je interni Froudov broj, čije vrijednosti ukazuju na tendenciju zračne mase da se giba oko planine, kako u promatranjnoj situaciji tako i u 10-godišnjem srednjaku za lipanj. Ovi rezultati sugeriraju da bi daljnja ispitivanja toga parametra, u različitim slojevima zasićene i nezasićene donje troposfere, mogla znatno doprinjeti boljem upoznavanju režima strujanja na području Zagreba i širem području istočnih Alpa, a time i uvjetima za točniju prognozu raspodjele oborine u mezorazmjerima.

LITERATURA

- Bader, M. J., and W. T. Roach, 1977: Orographic rainfall in warm sectors of depressions. *QJRM*, 103, 269—280.
- Bergeron, T., 1950: Über den Mechanisms der ausgieben Niederschläge. *Ber. Dtsch. Wetterd. U. S. zone*, 12, 225—232.
- , 1965: On the low level distribution of atmospheric water caused by orography. *Suppl. Proc. Int. Conf. Cloud Phys.*, May 1965, 96—100.
- , 1967: Discussion of the effect of orography on the areal fine structure of rainfall distribution. *Met. Studies of Precipitation I. Final Report 1964—66*, ONR Contract No N62 558—4486. *Met. Inst. Uppsala*.
- Bleasdale, A., and Y. K. Chan, 1972: Orographic influences on the distribution of precipitation. *WMO No. 326*, 2, 322—333.
- Bolton, D., 1980: The computation of equivalent potential temperature. *Mon. Wea. Rev.*, 108, 1046—1053.

- Browning, K. A., 1980: Structure, mechanism and prediction of orographically enhanced rain in Britain. Orographic effects in planetary flows. GARP publ. series. No. 23, WMO-ICSU, 450 pp.
- , C. W. Pardoe and F. F. Hill, 1975: The nature of orographic rain at wintertime cold fronts. *QJRMS*, 101, 333—352.
- Durran, D. R., and J. B. Klemp, 1982: On the effect of moisture on the Brunt-Väisälä frequency. *Journ. Atm. Sci.*, 39, 2152—2158.
- Gajić-Čapka, M., 1982: Prilog poznavanju uzroka ljetnog oborinskog maksimuma u Hrvatskoj. *Mag. rad, Sveučilište u Zagrebu*, 108 str.
- Jurčec, V., 1980: Weather characteristics over the Alps region during FGGE SOP II. Proceedings of the XVI Inter. Meeting on Alpine Meteorology, AIX-LES-BAINS, France 22—27 Sept. 1980.
- , and D. Papišta, 1978: On the correlation between precipitation amount in NW Yugoslavia and the general circulation anomalies. *Arbeiten aus der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik*, Wien, Heft 31, 31/1—10.
- Lalas, D. P., and F. Einaudi, 1973: On the stability of a moist atmosphere in the presence of a background wind. *J. Atm. Sci.*, 30, 795—800.
- , and —, 1974: On the correct use of the wet adiabatic lapse rate in stability criteria of a saturated atmosphere. *J. Appl. Meteor.*, 13, 318—324.
- Lipps, F. G., and R. S. Hemler, 1980: Another look at the thermodynamic equation for deep convection. *Mon. Wea. Rev.*, 108, 78—84.
- List, R. J., 1958: *Smithsonian Meteorological Tables*, 6th rev. ed., Smithsonian Institution Press, Wash. D. C. 527 pp.
- Nicholass, C. A., and T. W. Harrold, 1975: The distribution of rainfall over sub-catchments of the River Dee as a function of synoptic type. *Meteorol. Mag.*, 104, 208—217.
- Penzar, B. i I. Penzar, 1980, 1981: O položaju i uzrocima ekstrema u godišnjem hodu oborine u Hrvatskoj. *Geografski glasnik*, 41—42 (Dio I) 27—48, i 43 (Dio II) 27—49.
- Walter, B. A., and J. E. Overland, 1982: Response of stratified flow in the lee of the Olympic Mountains. *Mon. Wea. Rev.*, 110, 1458—1473.
- Wilson, J. W., and M. A. Atwater, 1972: Storm rainfall variability over Connecticut. *J. Geophys. Res.*, 77, 3950—3956.
- WMO/ICSU, 1982: ALPEX, Experiment design, GARP-ALPEX, No. 1, 99 pp.

SUMMARY

This paper investigates the causes of the intensity and distribution of convective precipitation in the area of Zagreb in a special case study 6 — 9 June 1979, at the end of FGGE SOP II period, when four radiosoundings daily were available for the studies of vertical atmospheric structure.

The normal rainfall distribution for June in this region (shown by Fig. 3.3 in the paper by Gajić—Čapka in this Volume) shows an increase of rainfall with altitude. In the considered situation the distribution was opposite with the maxima in the valleys.

The causes for such a distribution is primarily attributed to the surface layer moisture convergence, in which the orographic effects play a special role in the modification of wind field. The downslope mountain wind component during the night time when the convection occurred is superimposed on the easterly wind from the Pannonian plain on a larger scale, which is also subject to the flow separation on the windward side of the mountain. The air current moving around the mountain further intensifies due to channelling effects in the valleys and contributes to the convergence in the area of two maxima, one at the western (lee) foot of the mountain and another over the city (Fig. 4). The third maximum appears later in the night along the convergence line shown on Fig. 5.

The frontal passage was registered on June 7 by the surface data, but it was not expressed by the tropospheric thermal structure. Only the isentropes of the equivalent potential temperature discovered the tropospheric frontal zone (Fig. 8), which we indicated as a »pseudo-front«, between a long existing very dry air mass and a new impending mass with higher moisture. The front itself caused only very weak rain. The convection only developed the next day in conditionally unstable air mass with an increased moisture in the boundary layer, as a result of the surface moisture convergence discussed earlier.

It is concluded that in such a partially saturated atmosphere one could hope to achieve the quantitative precipitation forecast only by formulating three dimensional mesoscale models with a complete thermodynamics of moist air. However, some parameters from the »dry« models could be useful tools in the estimation of precipitation distribution.

One of these parameters is the internal Froude number, Fi , indicating the tendency for the air mass to move over or around the mountain. The calculation of Fi for this situation, as well as for the June normal state of the atmosphere, suggests the tendency for the boundary layer air to move around the mountains, but more case studies and Fi statistics are necessary to prove this hypothesis.