

NUMERIČKA SIMULACIJA STRUJANJA ZRAKA PREKO PLANINSKOG TERENA MEZORAZMJERA

Numerical Simulation of Airflow over Mesoscale Mountainous Terrain

BRANKA IVANČAN–PICEK

Republički hidrometeorološki zavod SRH Zagreb

Primljeno 8. svibnja 1986, u konačnom obliku 12. rujna 1986.

Sažetak: Razvijen je nelinearan, hidrostatički, dvodimenzionalni, numerički mezomodel strujanja zraka preko planina u izentropskom koordinatnom sustavu sa 20 nivoa. Model služi za ispitivanje utjecaja planina na troposferu i nižu stratosferu. Prikazana je simulacija strujanja preko Dinarida za 22. ožujka 1982. iz ALPEX SOP. Kao ulazni podaci korišteni su radiosondažni podaci opservatorija Zagreb–Maksimir. Za tu situaciju je karakteristično NE strujanje sve do visine 100 hPa. Prikazana je struktura i amplituda planinskog vala, vertikalni presjek horizontalne komponente vjetrova i polje vertikalnih brzina vjetrova. Rezultati simulacije daju prisutnost vala velike amplitude neposredno iznad zavjetrene strane planine, što je poznati rezultat za planine makrorazmjera. Međutim, za razliku od dosadašnjih rezultata simulacije, ovdje se pokazuje da se za planinske prepreke mezorazmjera, kao što su Dinaridi, maksimalna amplituda vala nalazi u blizini sloja maksimalne statičke stabilnosti. Numerička simulacija pokazuje da područjima s uzlaznim vertikalnim strujama odgovaraju područja smanjenih horizontalnih brzina. Rezultati su diskutirani na simetričnom i asimetričnom planinskom profilu.

Ključne riječi: numerički mezomodel, strujanje preko planine, planinski val, val velike amplitude, Dinaridske Alpe.

Abstract: We developed the nonlinear, hydrostatic, two-dimensional, numerical mesomodel of airflow over mountains in an isentropic coordinate system with 20 levels. The model is useful for investigating the influence of mountains on the troposphere and the lower stratosphere. A simulation of airflow over Dinaric Alps on 22 March 1982 from ALPEX SOP is presented here. For the initial data we used radiosounding data from Zagreb. The wind was up to 100 hPa level, NE. The present study gives an indication of the structure and amplitude of the mountain wave, and a cross section of the contours of horizontal and vertical velocity. The results of numerical simulation give the presence of a large amplitude wave closely above the lee side of the mountain. This is a well known result for macroscale mountains. Unlike previous results of numerical simulations, we observe, for mesoscale mountain like Dinaric Alps, maximum wave amplitudes in the neighborhood of the layer of maximal static stability. The results are discussed for the symmetric and asymmetric mountain profiles.

Key words: numerical mesomodel, airflow over mountains, mountain wave, large amplitude wave, Dinaric Alps.

1. UVOD

Planine su uzrok širokog spektra valnog gibanja. Hidrostatički planinski valovi jedna su od najvažnijih valnih formi nastalih u stabilnoj atmosferi kad zrak prelazi preko planinske prepreke čija je karakteristična širina otprilike 50 do 200 km (Klemp i Lilly, 1978). Takvi valovi nisu samo ograničeni na niže slojeve atmosfere već oni šire energiju i moment sve do viših nivoa troposfere, pa i u nižu stratosferu. Pojava planinskih zavjetrenih valova ovisi prvenstveno o statičkoj stabilnosti i vjetru.

Prva opažanja i analize sakupljena su kod Alake (1960). Noviji interes za planinske valove mezorazmjera potječe od spoznaje o njihovoj ulozi u dinamici jakih zavjetrenih vjetrova (Klemp i Lilly, 1975). Nakon toga dosta je rađeno na mezomodelima koji igraju važnu ulogu u istraživanju strujanja preko planina. Numeričke simulacije gibanja zraka preko mezoprepreke prikazane su u radovima: Mahrer i Pielke (1977), Klemp i Lilly (1978), Peltier i Clark (1979). One su bez sumnje donije-

le ogroman napredak u razumijevanju mezostrujanja preko planina, a saznanja iz tog područja prikazana su kod Smitha (1981). Eksperimenti, kao što su Colorado Lee Wave Program u 1971. i ALPEX u 1982. godini, predstavljaju važan izvor podataka.

U ovom radu prikazan je nelinearan, hidrostatički, dvodimenzionalni numerički model, koji po osnovnom sistemu jednadžbi gibanja slični modelu Eliassena i Rekestada (1971). To je jedan od prvih mezomodela kod nas koji prikazuje utjecaj planina u mezorazmjerima na strujanje zraka sve do visine od oko 10 km. Model je testiran na radiosondažnim podacima meteorološke stanice Zagreb–Maksimir za 22. ožujak 1982. iz ALPEX SOP. Karakteristično za tu situaciju je da je strujanje bilo NE smjera sve do visine 100 hPa. Ovdje je napravljena simulacija strujanja preko Velebita. Prikazana je struktura i amplituda planinskog vala, vertikalni presjek horizontalne komponente vjetrova i polje vertikalnih brzina vjetrova.

U ranijim radovima (Lilly i Klemp, 1979; Jusem i Barcilon, 1981) pokazano je da pojava planinskih valova ovisi, osim o statičkoj stabilnosti i vjetru, i o obliku planinske prepreke. Stoga su ovdje rezultati diskutirani na simetričnom i asimetričnom planinskom profilu.

2. NUMERIČKI MODEL

U ovom radu razmatrani su planinski valovi mezo-razmjera pomoću nelinearnog, dvodimenzionalnog, numeričkog modela. Osnovni sistem jednažbi gibanja na osnovi kojih je model napravljen slični modelu Eliassena i Rekustada (1971). Osnovne pretpostavke modela su da je gibanje: hidrostatičko, ovisno o vremenu, adijabatičko i dvodimenzionalno. Model je izrađen u izentropskom koordinatnom sustavu.

2.1. Jednažbe gibanja

Promatran je dvodimenzionalan slučaj horizontalnog jednolikog gibanja u $x -$ smjeru. Za komponente brzine može se stoga pretpostaviti da su neovisne o $y -$ koordinati ($\frac{\partial}{\partial y} = 0$). Uzimajući u obzir sve pretpostavke modela, jednažbe gibanja, jednažba kontinuiteta i hidrostatička jednažba u (X, θ) sistemu izgledaju ovako:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} - fv + \frac{\partial M}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + f(u - U) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t \partial \theta} + \frac{\partial}{\partial x} \left(u \frac{\partial p}{\partial \theta} \right) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial M}{\partial \theta} = \Pi \quad (4)$$

gdje je:

$$M = C_p T + gz \quad (5)$$

Montgomeryjev potencijal

i

$$\Pi = C_p \left(\frac{p}{p_0} \right)^K, \quad K = \frac{R}{C_p} \quad (6)$$

Exnerova funkcija

U gore navedenim jednažbama (1) – (6) imamo sljedeće oznake: $t -$ vrijeme,

$u, v -$ horizontalne komponente brzine,

$f - (= \text{const.})$ Coriolisov parametar,

$p -$ tlak,

$p_0 -$ referentni tlak ($= 1$ bar),

$R -$ plinska konstanta,

$C_p -$ specifična toplina,

$g -$ akceleracija gravitacije,

$z -$ visina iznad morskog nivoa,

$\theta -$ potencijalna temperatura,

$U -$ geostrofička komponenta brzine.

Sve varijable promatraju se samo kao funkcije od x, θ i t uz neki odabrani $y_0 = \text{const.}$

2.2. Početni i granični uvjeti

Svrha računa je da odredi stacionarni valni model u odnosu na početno stanje temperature i profila vjetra. Početni uvjeti su:

$$\begin{aligned} u(x, \theta, 0) &= U(\theta) \\ v(x, \theta, 0) &= 0 \\ p(x, \theta, 0) &= P(\theta) \end{aligned} \quad (7)$$

Numerička integracija vremenski ovisnih jednažbi računa se sve dok strujanje ne postane stacionarno. Početni uvjeti (7) ujedno predstavljaju i ulazne podatke u modelu. Brzina je dana na svim nivoima i za sva vremena uz pretpostavku da je paralelna s $x -$ osi i jednaka geostrofičkom vjetru U .

Na donjoj granici $\theta = \theta_a$ pretpostavljeno je da se plinski profil podudara s izentropskom plohom, tako da je potrebno odrediti samo visinu planinske prepreke $z = h(x)$. Granični uvjet pri tlu je

$$M(x, \theta_a, t) = \theta_a \cdot \Pi(x, \theta_a, t) + g \cdot U(x). \quad (8)$$

Gornja granica $\theta = \theta_T$ tretirana je kao slobodna površina uz uvjet:

$$p(x, \theta_T, t) = P(\theta_T) = \text{const.} \quad (9)$$

Jedan od vrlo važnih problema u modelu je formulacija izlaznog strujanja. Izlazni granični uvjeti trebali bi što je više moguće smanjiti refleksiju valne energije od izlaznog rubnog područja. Slično kao kod Nitte (1962), ovdje su izabrani ovi granični uvjeti:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial p}{\partial t} + u \frac{\partial p}{\partial x} &= 0 \end{aligned} \quad (10)$$

Individualne derivacije od u, v i p jednake su nuli na izlaznoj granici i zadovoljavaju jednažbe (1) – (3).

Refleksija valne energije javit će se i zbog umjetnog gornjeg uvjeta (9). Da bi eliminirali takvu refleksiju što je više moguće, uvedeno je na izlaznoj i gornjoj granici umjetno trenje, tzv. "Rayleighovo trenje" ν , koje ne mijenja red veličine jednažbi (1) i (2).

Jednažbe (1) i (2) zamijenimo s jednažbama:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} - fv + \frac{\partial M}{\partial x} + \nu(u - U) = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + f(u - U) + \nu v = 0 \quad (12)$$

Koeficijent ν je reda veličine 10^{-4} s^{-1} i jednak je nuli posvuda, osim blizu gornje i izlazne granice.

2.3. Numeričke vrijednosti

U ovom radu bila je namjera ispitati i simulirati sjeveroistočno (NE) strujanje zraka preko Dinarida. Jednadžbe (11), (12), (3) i (4) numerički su integrirane koristeći preskočnu (leap-frog) shemu s $2 \Delta x$, kao jedinicom dužine i $2 \Delta t$, kao jedinicom vremena. Mreža je podijeljena na 30×20 točaka u $x \theta$ – ravnini. Pri tome je Δx bio 7 km a $\Delta t = 20$ sekundi, što zadovoljava CFL – kriterij. Valovi čija je valna duljina usporediva sa širinom planinskog masiva (30–50 km) pojavljuju se kao rezultat simulacije, što isključuje u rješenju valove malih valnih duljina (manje od 7 km).

Profil planine prikazan je sa sinusnom funkcijom. Visina planinske prepreke uzeta je 1 km, a širina 50 km što dobro aproksimira teren Dinarida južno od Zagreba prema Senju. Područje bure i vertikalni presjek Zagreb – Senj dani su u radu Jurčec (1981).

Po vertikali varijabla $\Delta \theta$ se određuje da se što bolje prikaže stanje troposfere. U ovom slučaju uzeto je $\Delta \theta = 1$ K za prvih šest nivoa, $\Delta \theta = 3$ K od sedmog do petnaestog nivoa te $\Delta \theta = 10$ K od šesnaestog do dvadesetog nivoa. Izentropski koordinatni sustav je kvazistacionaran, tako da je visina z kojoj pripada zadnji nivo promjenljiva veličina koja ovisi o ulaznim podacima. Za slučaj simulacije koja je ovdje prikazana, 22. ožujka 1982, posljednji nivo nalazi se na 12300 metara.

3. REZULTATI I DISKUSIJA

Kao početne vrijednosti u modelu korišteni su radio-sondažni podaci meteorološke stanice Zagreb–Maksimir za 22. ožujak 1982, 3GMT, kada je na području sjever-

nog Jadrana puhala jaka bura. Sinoptička situacija prikazana je na slici 1. Centar ciklone nalazio se iznad Sicilije i južne Italije a troposferska cirkulacija iznad većeg dijela srednje i istočne Evrope karakterizirana je prizemnom anticiklonom. Os visinske doline protezala se preko središnjeg dijela Balkanskog poluotoka. U ovom slučaju karakteristično je da je strujanje iznad zapadnog dijela naše zemlje sve do 100 mb plohe bilo NE – smjera.

Na slici 2a) i b) prikazane su početne vrijednosti vjetra u , potencijalne temperature θ , Scorerovog parametra l^2 i Brunt – Vaisala frekvencije N^2 . Za tipične atmosferske profile vjetra i potencijalne temperature l^2 je funkcija visine. Velike vrijednosti l^2 uzrokovane su visokom stabilnošću u inverzionom sloju i u višim slojevima troposfere. U nižim slojevima troposfere (između 2. i 3.5 km) zapaža se velika statička stabilnost (sl. 2 b).

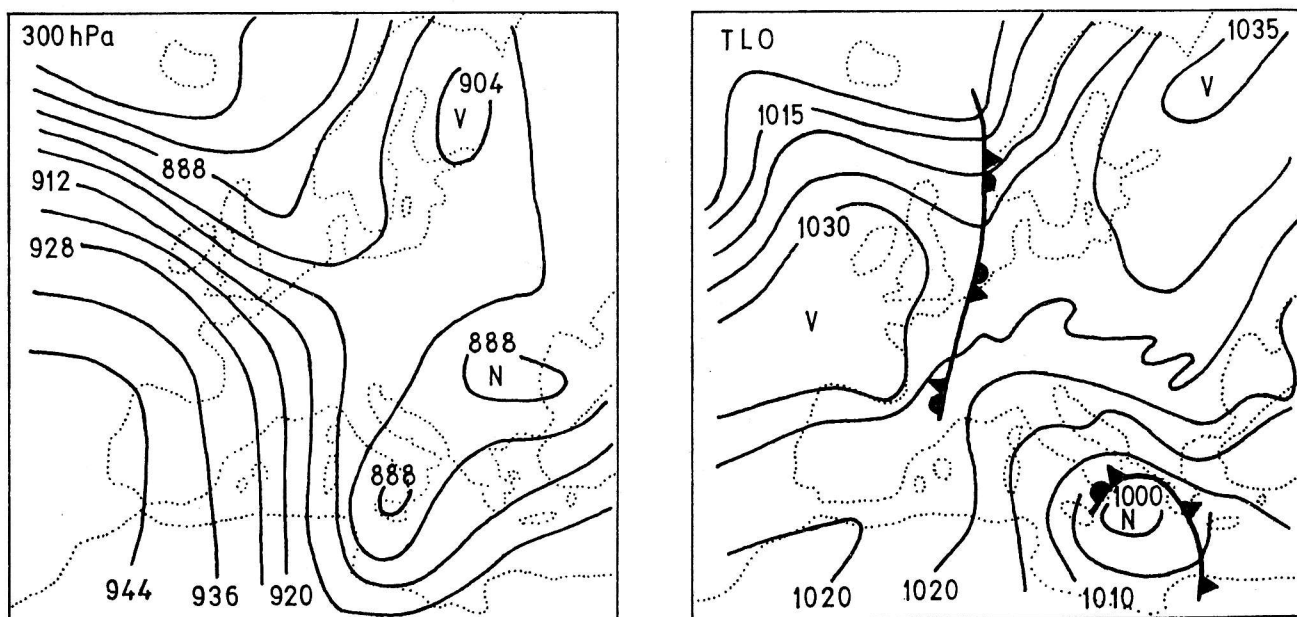
Rezultatna polja koja ovaj numerički model daje su polje izopotencijalnih linija (strujnice), te polja horizontalne i vertikalne komponente vjetra. Numerička simulacija vršena je na simetričnom i asimetričnom planinskom profilu.

Polje vertikalnih brzina w dobiveno je termodinamičkom metodom, slično kao kod Lilly i Kennedy (1973), u kojoj se w procjenjuje iz zakrivljenosti izopotencijalnih ploha.

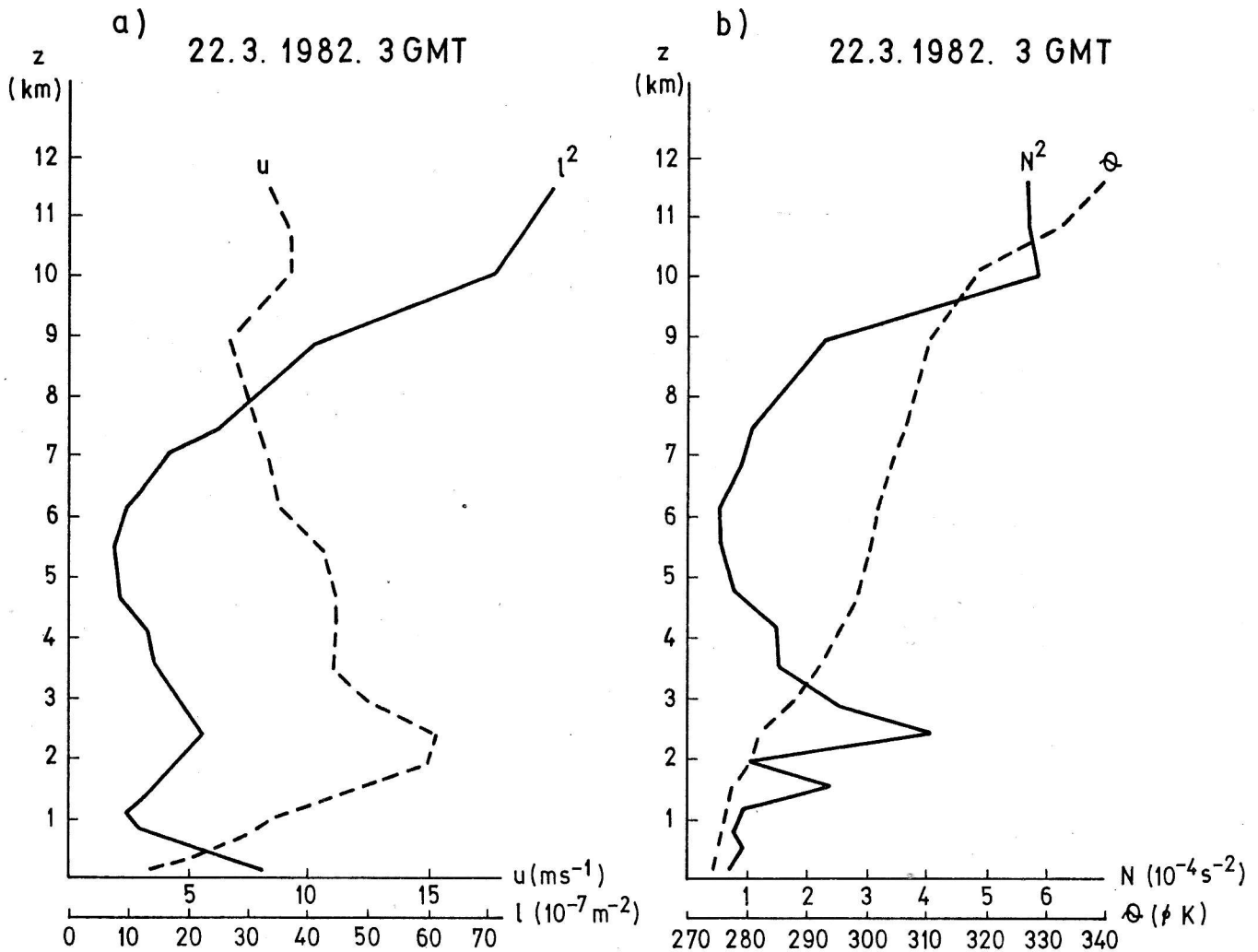
$$w = u \left(\frac{\partial z}{\partial x} \right)_{\theta} \tag{13}$$

Slika 3 prikazuje vertikalni presjek polja potencijalne temperature. Iz oblika izabranih izentropskih ploha uočljiv je valni oblik polja, koji prvenstveno ovisi o planinskom profilu i stanju atmosfere (statička stabilnost i

22. 3. 1982. 00 GMT



Sl. 1 Prizemna sinoptička karta i 300 hPa karta za 22. 3. 1982. god.
 Fig. 1 The surface synoptic situation and AT 300 hPa for 22 March 1982 at 3 GMT.



Sl. 2. Profili početnih vrijednosti
 a) vjetra (ms^{-1}) i Scorerovog parametra l^2 (10^7 m^{-2})
 b) potencijalne temperature θ (K) i Brunt - Vaisala frekvencije N^2 (s^{-2}) sondažnih podataka za Zagreb - Maksimir za 22. 3. 1982. godine u 3 GMT

Fig. 2. Profiles of the background values of:
 a) wind u (ms^{-1}) and Scorer parameter l^2 (10^7 m^{-2})
 b) potential temperature θ (K) and Brunt-Vaisala frequency N^2 (10^{-4} s^{-2}) from the upstream sounding data from Zagreb on 22 March 1982.

vjetar). Krijeste valova, kao i doline, šire su u više slojeve atmosfere. U nižim slojevima do oko 3 km visine, izentropske plohe slijede oblik planinske prepreke. Valovi imaju nagib nasuprot struje s visinom. Uzlazna gibanja javljaju se neposredno iznad navjetrine brda, dok se na većoj visini iznad navjetrine pojavljuju silazna gibanja. Plohe potencijalne temperature pokazuju prisutnost vala velike amplitude neposredno iznad zavjetrene strane planine. Najjače valno gibanje zapaža se u nižoj i srednjoj troposferi. Maksimalna amplituda vala dobiva se blizu sloja maksimalne statičke stabilnosti (između 2.5 i 4.5 km visine). U višim slojevima troposfere (blizu tropopauze) val ima suprotnu fazu u usporedbi sa strujanjem u nižim nivoima. Ovi rezultati koji su postignuti s hidrostatičkim modelom isključuju kao rješenje rezonantne zavjetrene valove koji su nehidrostatičke prirode.

Polja izabranih ploha potencijalne temperature dobivena su za simetričan i asimetričan profil planinske prepreke. Sa slike 3 a) i b) uočljivo je da amplituda vala

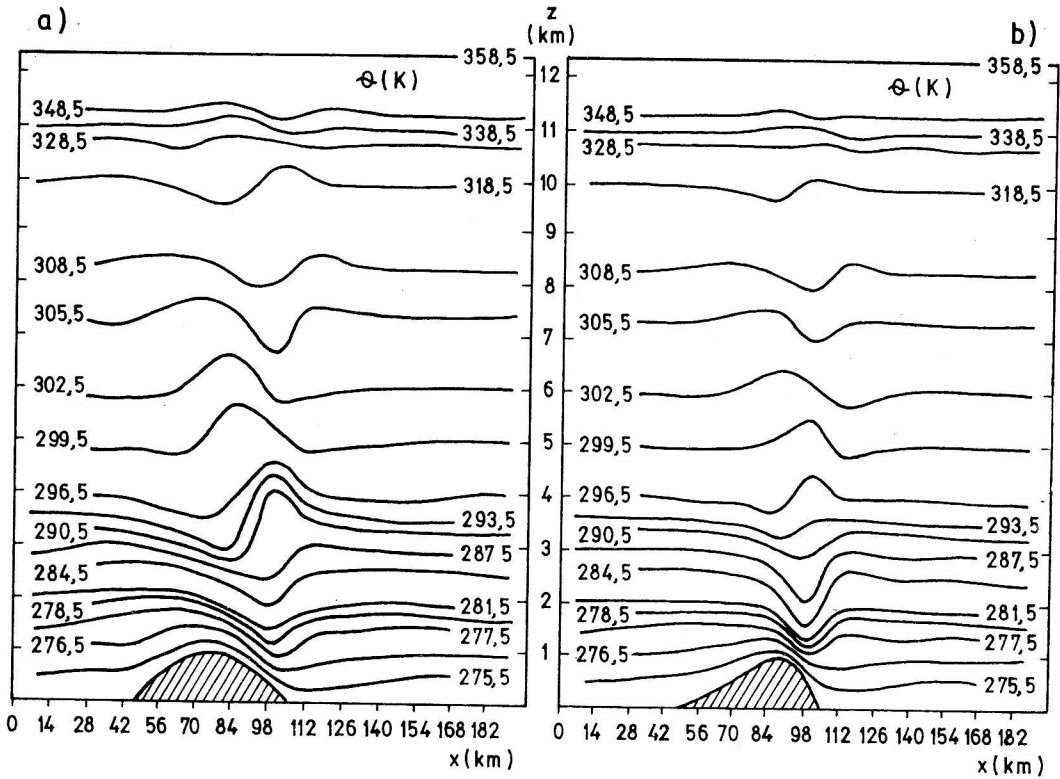
ovisi o amplitudi prepreke. Kod asimetričnog profila uočljiva je jača strmina strujnica i veća amplituda vala.

Velika funkcionalna veza profila planine i amplitude vala dana je u radu Lilly i Klemp (1979). Pokazano je da je profil s postepenom navjetrenom i strmom zavjetrenom stranom optimalan za nastanak valova i pojavu jakih prizemnih vjetrova.

U svom radu Klemp i Lilly (1975) prikazali su mehanizam nastanka valova velikih amplitude i njihovu vezu s pojavom jakih vjetrova u zavjetrini planine. Njihovi rezultati pokazuju da osnovnu ulogu ima inverzijski sloj, koji se vrlo često opaža neposredno iznad planinskog vrha. Da bi došlo do pojave jakih vjetrova u zavjetrini potrebno je određeno stanje atmosfere, a to je statička stabilnost u nižoj troposferi i jak vjetar neposredno iznad vrha planine. Tome pridonosi i djelomična refleksija valne energije iz viših slojeva u niže.

Slika 4. prikazuje razdiobu horizontalne komponente brzine vjetra. Njezina početna prizemna vrijednost je 3.4 ms^{-1} , a rezultatna vrijednost numeričke simula-

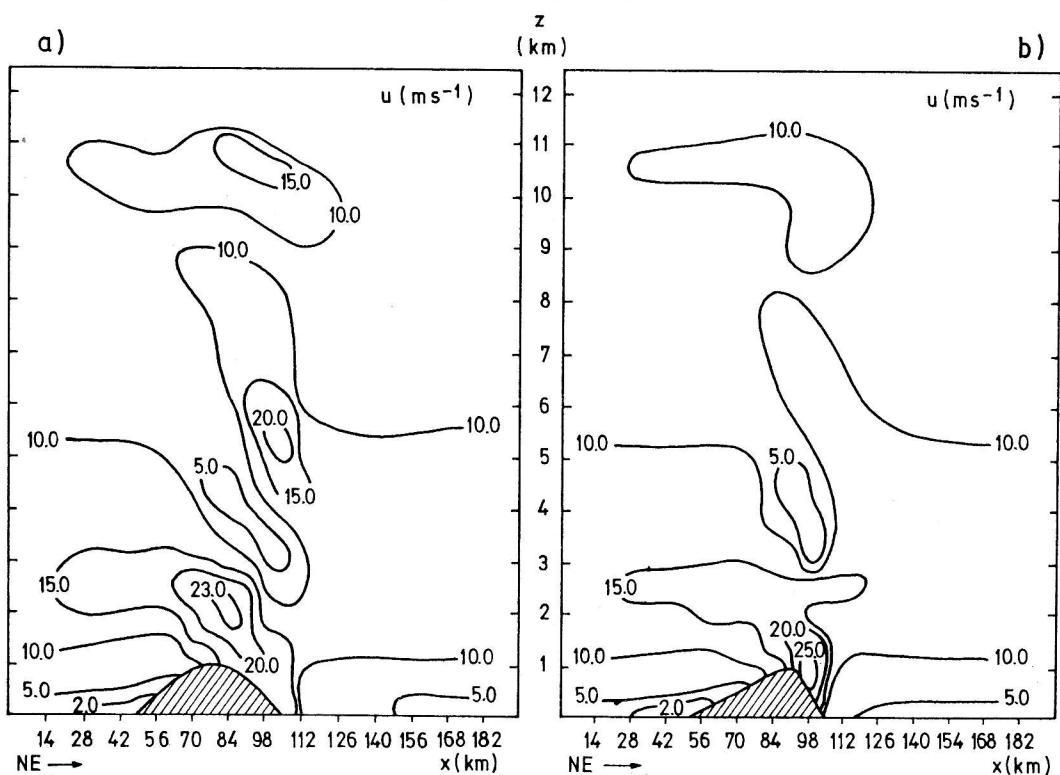
22. 3. 1982. 3 GMT



Sl. 3. Polje potencijalne temperature θ (K) – numerička simulacija 22.3. 1982. 3 GMT
 a) simetričan profil
 b) asimetričan profil

Fig. 3. Displacement of potential temperature surfaces; numerical simulation of 22 March 1982 et GMT
 a) symmetric profile
 b) asymmetric profile

22. 3. 1982. 3 GMT



Sl. 4. Razdioba horizontalne komponente vjetra (ms^{-1}), numerička simulacija 22. 3. 1982. 3 GMT
 a) simetričan profil
 b) asimetričan profil

Fig. 4. Distribution of the horizontal velocity component (ms^{-1}) for numerical simulations as in Fig. 3.

cije u zavjetrini planine je brzina veća od 15 ms^{-1} . Maksimalne vrijednosti horizontalne brzine nalaze se u zavjetrini neposredno iznad planinskog vrha. U slučaju simulacije sa simetričnim profilom (sl 4a), najveća vrijednost brzine (veća od 23 ms^{-1}) nalazi se na visini od 2 km. Kod asimetričnog profila (sl 4b) dobivene su malo veće vrijednosti brzine vjetra (veće od 25 ms^{-1}), koje su smještene nešto niže u zavjetrini nego u slučaju simetrične prepreke. Ovi rezultati su u skladu s prijašnjim saznanjem da je planinska asimetrija optimalna za nastanak intenzivnog vala i jakih prizemnih vjetrova. Budući da je strujanje blokirano na navjetrenoj strani planine, dolazi do smanjenja horizontalne brzine vjetra. U našem slučaju prizemni vjetar se smanjuje na vrijednost manju od 2 ms^{-1} .

Polja vertikalnih brzina prikazana su na slici 5 a) i b). U oba slučaja dobivena je vertikalna komponenta brzine vjetra prema dolje neposredno iznad vrha planine i u njoj zavjetrini. Maksimalna vrijednost vertikalne brzine u oba slučaja je oko 1.0 ms^{-1} .

Valni oblik strujanja igra dominantnu ulogu kod polja vertikalnih brzina. Amplitude valova, a isto tako i vrijednosti vertikalne brzine, mnogo su manje u višim slojevima atmosfere nego u prizemnom sloju. Iz slika 4 i 5 može se zamijetiti da područjima s uzlaznim vertikalnim strujama odgovaraju područja smanjenih horizontalnih brzina.

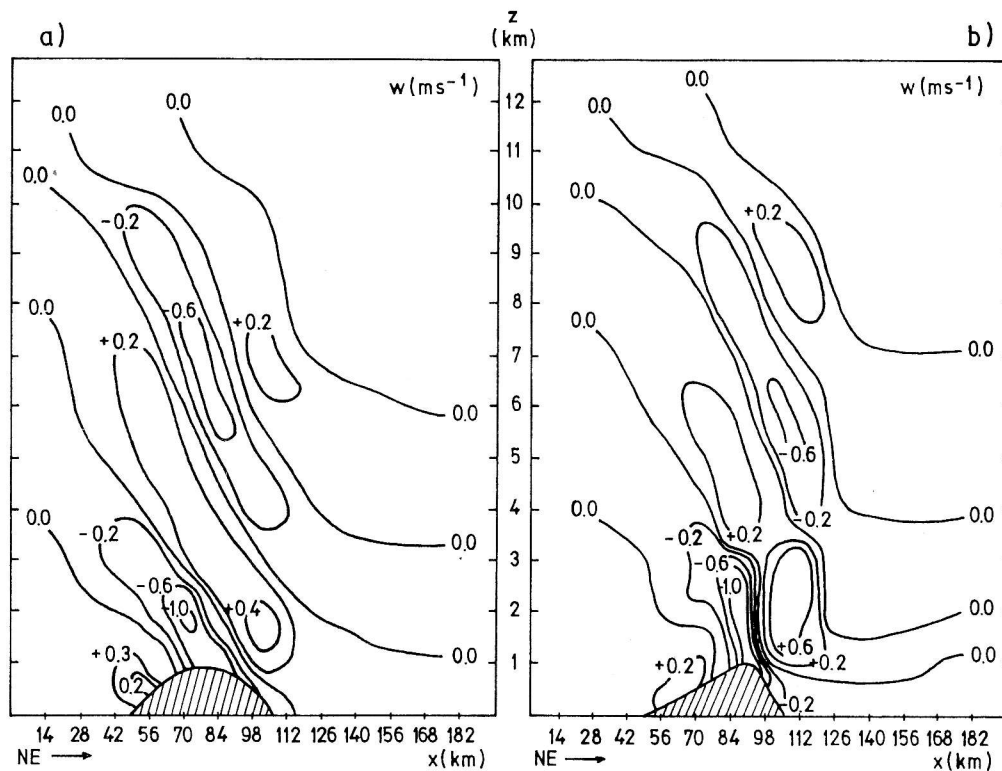
Opisani rezultati slažu se s opaženim vrijednostima brzine vjetra. U Senju je 22. 3. 1982. najveća srednja satna vrijednost brzine vjetra bila 16.1 ms^{-1} između 4 i 5 GMT, te ponovno između 8 i 9 GMT. Maksimalna vrijednost brzine vjetra bila je 24.2 ms^{-1} , a izmjerena je oko 8 GMT.

4. ZAKLJUČAK

Primjena ovog modela za strujanje zraka preko planinske prepreke, pored svih pojednostavljenja, opisuje u zadovoljavajućoj mjeri najvažnije lokalne fenomene koje generira orografija mezorazmjera.

Rezultati dobiveni ovim hidrostatičkim modelom, prvim takve vrste kod nas, koji opisuje stanje atmosfere u cijeloj troposferi i donjoj stratosferi pri prijelazu zraka preko planinske prepreke mezorazmjera, isključuju pojavu rezonantnih kratkovalnih zavjetrenih valova. Opisane karakteristike modela omogućuju njegovu primjenu za opis pojava olujnih vjetrova na zavjetrenim stranama planina koje prate izraženi planinski valovi uz poznate početne uvjete na strani navjetrine. U našem slučaju NE strujanja, radiosondažni podaci opservatorija Zagreb-Maksimir dobro prikazuju stanje atmosfere na navjetrenoj strani Dinarida. Budući da se u numeričkoj simulaciji koriste realni podaci, to daje mogućnost primjene ovog mezomodela za prognozu jakih vjetrova u zavjetrini planina.

22. 3. 1982. 3 GMT



Sl. 5. Razdioba vertikalne komponente vjera $w \text{ (ms}^{-1}\text{)}$, numerička simulacija 22. 3. 1982. 3 GMT
a) simetričan profil
b) asimetričan profil

Fig. 5. Distribution of vertikal velocity component (ms^{-1}) for numerical simulation as in Fig. 3.

Iz oblika izabranih izentropskih ploha uočljiv je valni oblik polja koji prvenstveno ovisi o planinskom profilu i stanju atmosfere, što je poznati rezultat za planine makrorazmjera (Klemp i Lilly, 1978). Kao i u rezultati prethodno navedenih autora, zapaža se prisutnost vala velike amplitude neposredno iznad zavjetrene strane planine. Međutim, za razliku od dosadašnjih rezultata simulacije, ovdje se pokazuje da se za planinske prepreke mezorazmjera, kao što su Dinaridi, maksimalna amplituda vala nalazi u blizini sloja maksimalne statičke stabilnosti. Osim toga, numerička simulacija ovdje pokazuje da područjima s uzlaznim vertikalnim strujama odgovaraju područja smanjenih horizontalnih brzina, a to se slaže s opažanjima u konkretnoj sinoptičkoj situaciji.

Kod asimetričnog profila uočljiva je jača strmina strujnica i veća amplituda vala. Valni oblik strujanja igra dominantnu ulogu i kod polja vertikalnih brzina. Amplitude valova, a isto tako i vrijednosti vertikalne brzine, mnogo su manje u višim slojevima atmosfere nego u prizemnom sloju.

SUMMARY:

The exposed hydrostatic model is the first example to be applied in our country for study of the state of the atmosphere in the whole troposphere and the lower stratosphere. The numerical model of air flow over mountains accounts, despite inherent approximations, for the main local phenomena generated by mesorography. As a consequence of the hydrostatic approximation, the typical resonant lee wavelengths are excluded. For the given initial conditions on the windward slope the model appears to be suitable in reproducing the strong downslope surface winds on the lee side of a mountain, related to the large amplitude mountain waves. For the NE air flow under consideration, the soundings at Zagreb provide a good data base of upslope Dinaric Alps atmospheric state.

The fact, that the numerical simulation at hand uses the real data, enables the application of this mesomodel in forecasting strong downslope winds. The shape of selected isentropic surfaces displays a wave field depending primarily upon the mountain profile and the state of the atmosphere. This is a well known result for the macroscale mountains (Klemp and Lilly, 1978). Similarly to the results of Klemp and Lilly we observe the presence of a large amplitude wave closely above the lee side of the mountain. Unlike previous results of numerical simulations, we observe (for mesoscale mountains, like the Dinaric Alps) the

maximum wave amplitudes in the neighborhood of the layer of maximal static stability. For an asymmetrical profile the streamlines are steeper and the wave amplitudes are strengthened.

The wave flow also plays a dominant role in the vertical velocity fields. The wave amplitudes and the vertical velocity diminish considerably in the higher levels of the atmosphere as compared to the ground layers. In the present numerical simulation, the regions of the upward vertical flows correspond to decreased horizontal velocity. The last result conforms with the observation in the considered synoptic situation.

LITERATURA

- Alaka, M. A. (ed.), 1960: The airflow over mountains, Tech. Note 34, WMO.
- Eliassen, A. i J. E. Rekustad, 1971: A numerical study of mesoscale mountain waves, *Geophys. Publ.* 28, (3).
- Ivančan-Picek, B., 1984: Numerical model of meso-scale flows over mountainous terrain, 18 ICAM, Opatija, 25–29 September 1984, 101–104.
- Jurčec, V., 1981: On mesoscale characteristics of bora conditions in Yugoslavia, *PAGEOPH*, Vol. 119, 640–657.
- Jusem, J. C. i A. Barcion, 1981: Hydrostatic mountain waves produced by asymmetric ridges, *Geophys. Astrophys. Fluid Dynamics*, Vol. 17, 3–14.
- Klemp, J. B. i D. K. Lilly, 1971: The dynamics of wave induced downslope winds, *J. Atmos. Sci.* 28, 320–329.
- Klemp, J. B. i D. K. Lilly, 1978: Numerical simulation of hydrostatic mountain waves, *J. Atmos. Sci.* 35, 78–107.
- Lilly, D. K. i P. J. Kennedy, 1973: Observations of stationary mountain wave and its associated momentum flux and energy dissipation, *J. Atmos. Sci.* 30, 1135–1152.
- Lilly, D. K. i J. B. Klemp, 1979: The effects of terrain shape on nonlinear hydrostatic mountain waves, *J. Fluid. Mech.* Vol. 95, part 2, 241–261.
- Mahrer, Y. i R. A. Piclke, 1977: A numerical study of the airflow over irregular terrain. *Contrib. Atmos. Phys.* 60, 9–113.
- Makjanić, B., 1978: Bura, jugo, etezija (Bora, Scirocco, Ethesian) Fed. Hydromet. Inst., Belgrade, 77 pp.
- Nitta, T., 1962: The outflow boundary condition in numerical time intergration of advective equations. *J. Meteor. Soc. Japan*, Ser. II, 40, p. 13.
- Peltier, W. R. i T. L. Clark, 1979: The evolution and stability of finite amplitude mountain waves. Part II: surface wave drag and severe downslope windstorms. *J. Atmos. Sci.* 36, 1498–1529.
- Smith, R. B., 1979: The influence of mountains on the atmosphere. *Advances in Geophysics*, Vol. 21, Academic Press, 87–228.
- Yoshino, M. M. (ed), 1976: Local Wind Bora, University of Tokyo.