

O MOGUĆNOSTI OBJEKTIVNOG LOCIRANJA TURBULENCIJE BURE

Possibility of Objectively Locating Bora Turbulence

KATARINA STANKOVIĆ

Savezna uprava za kontrolu letenja

Zrakoplovni meteorološki centar, aerodrom Zagreb

Primljeno 20. kolovoza 1988, u konačnom obliku, 15. studenog 1988.

Sažetak: Rad prezentira ideju da turbulenciju bure uzrokuje "lom" gravitacijskih smicajućih valova malih valnih duljina i da se ova vrsta turbulencije može dijagnosticirati pomoću indikatora sinoptičkih razmjera, često korištenih kao indikatora turbulencije vedrog zraka. Na ovoj koncepciji izvršena je dijagnoza slučaja turbulencije bure od 7 ožujka 1982 u ALPEX SOP. Rezultati su pokazali dobro slaganje s opserviranom turbulencijom u buri.

To znači da se područja turbulencije mogu objektivno dijagnosticirati pomoću super-kritičnih vrijednosti indikatora, dobivenih djelomično iz teorije a djelomično iz iskustva.

K l j u č n e r i j e ě i: turbulencija bure, Kelvin-Helmholtzova nestabilnost, gravitacijski smicajući valovi.

Abstract: The possibility that bora turbulence is caused by breaking of gravity shear waves of the smallest wave lengths which may be diagnosed by means of synoptic-scale indicators was investigated by calculating these parameters for the bora case of 7 March 1982 during the ALPEX SOP. The results have shown satisfactory agreement with observed bora turbulence locations. This suggests that the areas of turbulence can be diagnosed objectively by means of super-critical values of indicators, partly derived from theory and partly known from experience.

Key words: bora turbulence, Kelvin-Helmholtz instability, gravity shear waves.

1. UVOD

Dijagnoza i prognoza turbulencije općenito spada u red vrlo kompleksnih i suptilnih postupaka. Takve postupke je vrlo komplicirano izvoditi a posebno kada su za izvođenje na raspolaganju parametri velike skale, stotinu i više puta veće od skale samog fenomena turbulencije.

Budući da procesi koji proizvode turbulenciju primarni izvor imaju u procesima velike skale, koji sa maloskalnim procesima čine zatvoren krug i u stalnoj su međusobnoj interakciji, kroz pribavljanje i rasipanje kinetičke energije u atmosferi, razumljivo je da je moguće poznavanjem određenih procesa velike skale dijagnosticirati zbivanja na maloj skali.

Ovdje se nameće potreba da se odgovori na sintetsko pitanje, koje u sebi sadrži kvalitativni i kvantitativni dio. Kvalitativno treba odgovoriti koje su to dinamičke veličine putem kojih se najočitije reflektiraju turbulentna zbivanja. A zatim treba pokušati naći njihove kvantitativne odnose s ciljem da se ustanove kriteriji koji bi služili u praksi za dijagnozu i prognozu turbulencije.

Da bi se pokušalo odgovoriti na pitanje koje su to veličine koje u sebi sublimiraju turbulentnu prirodu atmo-

sferskih procesa, nužno je prodrijeti u fizikalnu suštinu atmosferskih zbivanja i pokušati pronaći najadekvatniji teorijski model koji izražava fiziku turbulentnih procesa.

Oslanjajući se na mnoga istraživanja koja sadrži novija meteorološka literatura Klemp and Lilly (1975), Crook and Miller (1985), Crook (1988), Smith (1987), Merrill (1977), Einaudi et al. (1979) i drugi, moguće je razmišljati u pravcu valnog porjeka turbulencije u buri.

Odgovor na fundamentalno pitanje koje glasi "koji procesi su odgovorni za generiranje turbulencije u buri", u ovom radu nudi se kao hipoteza koja je djelomično diskutirana u radu K. Stanković (1988). Radi se o pretpostavci da je turbulencija u buri uzrokovana Kelvin-Helmholtzovom nestabilnosti. Svoj temelj ovo ima u sintetskom pristupu mnogobrojnim spoznajama, općenito o turbulentnim procesima u fluidima. Vjeruje se da se hipoteza djelomično može provjeravati na podacima iz ALPEX SOP kada je vremenska i prostorna rezolucija mjerenih podataka zadovoljavala kriterije ovakvih istraživanja, što je i učinjeno u ovom radu.

Mnoge činjenice ukazuju da je turbulencija u buri posljedica narušavanja stabilnosti gravitacijskih valova različitih valnih duljina. Stabilnost pojedinih valnih duljina

narušava se i prostorno i vremenski neujednačeno, što uzrokuje sporadičnu prirodu turbulencije u buri. Energija gravitacijskih smicajućih valova u području bure povremeno se rasipa preko različitih valnih duljina uzrokujući jaču ili slabiju turbulenciju zavisno od momentalnog odnosa onih faktora koji ovu energiju crpe iz drugih procesa i faktora koji tu energiju troše.

Kako će se vidjeti, u ovom istraživanju turbulencija u buri je povezana sa prizemnim slojevima visokog statičkog stabiliteta u kojima se zbog različitih uzroka pojavljuje superkrično vertikalno smicanje vjetra. Takvi slojevi različitih stabiliteta i različitih debljina primarno se poremećuju u formi, donekle pravilnih valnih gibanja, koja se zavisno od odnosa smicanja i stabiliteta pretvaraju u sasvim nepravilna turbulentna gibanja, koja su posljedica tako nastalih valova. Mnogobrojne spoznaje o raznim interakcijama u ovakvim slojevima dobivene su iz velikog broja različitih numeričkih modela koji simuliraju razvoj i lom gravitacijskih valova uzimajući u obzir i razne utjecaje orografije tla.

Bitne kvalitativne spoznaje o turbulentnim procesima, kao i kriterije za njihovo nastupanje, daje i razjašnjava linearna, tj. analitička teorija. Ona daje sasvim zadovoljavajuće rezultate kada se traže kriteriji za početak turbulentnih procesa. Detalji koji opisuju zbivanja nakon početka turbulencije ne mogu se dobiti iz jednostavnog analitičkog pristupa.

U cilju razumijevanja turbulentnih procesa i istraživanja kriterija za nastup turbulencije u poglavlju 2 se daju teorijske osnove za valove u stratificiranim fluidima. O kriterijima koje predviđa ova teorija diskutira se u poglavlju 3 a njihova primjena na konkretnom slučaju uz diskusiju rezultata data je u poglavlju 4. Završne primjedbe i zaključci sadržani su u poglavlju 5 ovog članka.

2. TEORIJSKA BAZA ZA PROUČAVANJE TURBULENCIJE U STABILNO STRATIFICIRANINIM FLUIDIMA SA SMICANJEM

Turbulencija je osnovna i bitna karakteristika lokalnog vjetra bure. Atmosfera je u slojevima bure stratificirana tako da pruža mogućnost razvoja gravitacijskih smicajućih valova raznih valnih duljina. Kritični uvjeti za lomljenje gravitacijskih valova za različite valne duljine postižu se vremenski i prostorno nejednoliko, što ima za posljedice haotično, sporadično, nepravilno gibanje čestica zraka u buri. Ovakvo gibanje je u biti rezultat nejednolike raspodjele kinetičke energije u slojevima bure.

Teorijski modeli koji tretiraju tako dobivenu raspodjelu energije vrlo su kompleksni jer moraju uključivati veoma velik broj činilaca koji imaju u tome udjela. Jasno je da su određena zbivanja u slojevima bure posljedica u prvom redu opće raspodjele makro cirkulacijskih sistema. Takva raspodjela dovodi do određene osnovne stratifikacije atmosfere, kao i raspodjele vjetra po vertikali i horizontali u tim slojevima. Ovakva raspodjela meteoroloških parametara uvjetuje razvoj gravitacijskih smicajućih valova koji se od vremena do vremena, zavisno o valnoj duljini i momentalnom odnosu stabiliteta i smicanja, raspadaju ili ponovno generiraju. Proces "raspadanja" ili "loma" gravitacijskih smicajućih valova u buri popraćen je slabijim ili jačim rasipanjem energije koja se

manifestira kao turbulencija u buri. Kako je bura vjetar koji je jako lokalno izražen, gdje orografija ima presudnu ulogu, uzimanje u obzir utjecaja orografije na razvoj i raspadanje gravitacijskih valova, i u vezi s tim na pojavu turbulencije, je od posebnog značaja. Gravitacijski valovi se pod utjecajem deformacijskih efekata induciranih planinskom preprekom znatno lakše lome, ponekad se superponiraju efekti loma i na taj način izazivaju vrlo intenzivnu turbulenciju, što je u biti ogromno rasipanje kinetičke energije na veoma malom prostoru.

U teoretskom smislu ovo rasipanje energije odvija se uvijek kada su u nekom sloju ostvareni uvjeti za razvoj Kelvin-Helmholtzove nestabilnosti (K H N). Teorija K H N je bazična teorija za razumijevanje nastajanja turbulencije u buri. Kvalitativna ocjena razvoja K H N može se dobiti iz distribucije Richardsonovog broja u slojevima bure.

Osnovna jednadžba koja omogućuje izvođenje i diskusiju kritičnih uvjeta za nastanak K H N je tzv. Taylor-Goldsteinova jednadžba (Gossard and Hooke, 1975):

$$\frac{d^2 w}{dz^2} + \left(\frac{N^2}{(U-c)^2} - k^2 - \frac{d^2 U/dz^2}{U-c} \right) w = 0, \quad (1)$$

gdje je w vertikalna brzina vjetra, $N^2 = g/\theta (d\theta/dz)$ je statički stabilitet atmosfere. U je horizontalna brzina vjetra, c je fazna brzina vala, i k je valni broj. Ova jednadžba prikazuje poremećenje vertikalne brzine vjetra u Boussinesq fluidu zbog promjene vertikalnog smicanja vjetra. Izvedena je iz primitivnih jednadžbi uz pretpostavku da su poremećenja mala, eliminiranjem svih varijabli osim jedne, u ovom slučaju vertikalne brzine. Jednadžba je služila mnogim autorima za istraživanje utjecaja smicanja na statički stabilne slojeve atmosfere. U granicama linearne teorije Taylor-Goldsteinova jednadžba generira rješenje u obliku:

$$w = \text{Re} (A e^{ik(x-ct)}), \quad (2)$$

odnosno u obliku:

$$w = A(z) \exp(i(Ri-0.25)^{1/2}z), \quad (3)$$

gdje je A amplituda poremećenja, $k = 2\pi/L$ valni broj koji je realan i c je fazna brzina koja može biti kompleksna, Ri je Richardsonov broj u formi:

$$Ri = \frac{N^2(z)}{(dU(z)/dz)^2} \quad (4)$$

Svi modeli bez obzira na njihovu kompleksnost ponašaju se tako da valno rješenje jednadžbe (1) ne može egzistirati ako je $Ri < 1/4$.

Uobičajena procedura rješavanja jednadžbe (1) sastoji se u tome da se pretpostavljeni rješenje (2) uvrsti u jednadžbu (1) i da se traži zadovoljavanje graničnih uvjeta na jednom i drugom kraju poremećenog sloja. Ovakav postupak općenito rezultira u disperzionu relaciju:

$$f(\alpha, Ri, c) = 0 \quad (5)$$

koja povezuje bezdimenzionalni valni broj α s faznom brzinom c . Za $c_i = 0$ (5) locira neutralna rješenja na krivulji koja ravninu (α , Ri) dijeli na dva dijela, stabilni ($c_i = 0$) i nestabilni ($c_i > 0$) dio. Sva rješenja daju zavisnost valne duljine L o debljini poremećenog sloja Δz .

Utjecaj donje čvrste granice na rješenje Taylor-Goldsteinove jednadžbe je velik i znatno komplicira matematiku takvog rješavanja (Lalas et al., 1976. i drugi). Donja granica ima destabilizirajući efekt na veće valne duljine. Time se povećava spektar poremećenih valnih duljina koje izazivaju turbulenciju. Efekti poremećenja često se superponiraju i mjestimično izazivaju veoma intenzivnu turbulenciju. Valne duljine koje ne dostižu kritične uvjete za lom i dalje putuju kao valovi. Oni stupaju u interakciju s poremećenim valnim duljinama i na taj način se u slojevima bure odvijaju vrlo kompleksni i zamršeni procesi koji se kroz rasipanje kinetičke energije manifestiraju kao turbulencija bure.

Centralno pitanje na koje se pokušava dati odgovor u ovom radu je pitanje: kako na osnovi parametara velike skale procijeniti zbivanje na maloj skali u području turbulencije i na taj način doći do metode dijagnoze i prognoze turbulencije? U svakom slučaju računanje Ri broja za slojeve bure treba dati određenu indicaciju o egzistenciji turbulencije jer je Ri broj, kako se vidi iz rješenja Taylor-Goldsteinove, jednadžbe egzaktan parametar koji diktira da li će rješenje biti stabilno ili nestabilno zavisno od toga da li je Ri broj veći ili manji od kritičnog $Ric = 1/4$.

Određena iskustva o egzistenciji stratificirane turbulencije kao što je clear air turbulence (CAT) rezultirala su mnogobrojnim spoznajama (Stanković, 1985, 1986, 1987), koje se, nadamo se, korisno mogu upotrijebiti za istraživanje metoda dijagnoze i prognoze turbulencije u buri. U tom smislu potrebno je poći od ideje da je turbulencija u buri uzrokovana Kelvin-Helmholtzovom nestabilnošću. Mnoge činjenice govore u prilog ovoj hipotezi (Smith, 1987) a u ovom radu će se na konkretnim podacima iz ALPEX SOP pokazati da je moguće procjenjivati turbulenciju u buri poznavanjem distribucije parametara koji se temelje na Taylor-Goldsteinovoj jednadžbi, odnosno egzaktom parametru Ri i iz njega izvedenim parametrima. Svi ovdje računati parametri daju indicaciju o procesima male skale koji izazivaju turbulenciju, tj. o procesima porasta i "pucanja" amplituda gravitacijskih smicajućih valova različitih valnih duljina. "Eho" ovih procesa slabije se "čuje" na mezo skali nego na mikro, dok se na sinoptičkoj skali, zavisno od intenziteta, slabije izraženi procesi izgube, njihov "eho" ne stigne do velike skale. Mnogi procesi se tako isfiltriraju i nije ih moguće detektirati, čak i "najsposobnijim" indikatorima sinoptičke skale.

3. OBJEKTIVNO DIJAGNOSTICIRANJE TURBULENCIJE U BURI

U cilju demonstriranja ideje da je turbulencija povezana s burom uzrokovana Kelvin-Helmholtzovom nestabilnošću i da takva kategorija turbulencije može biti dijagnosticirana parametrima iz sinoptičke skale, često korištenim u lociranju turbulencije vedrog zraka, odabran je slučaj avionski dijagnosticirane turbulencije iz ALPEX SOP. Sva turbulencija izmjerena toga dana dogodila se u

vedrom zraku (Smith, 1987). Ova činjenica je bila jedan od principijelnih razloga za razmišljanje o primjeni teorije stabilneta stabilno stratificiranih fluida sa smicanjem na turbulenciju u buri, kao i za primjenu već upotrebljivanih indikatora turbulencije sa velike skale. Sposobnost dijagnosticiranja turbulencije je istražena pomoću onih sinoptičko sklanih parametara za koje je već ustanovljena korelacija s KHN. Najpoznatiji i teorijski najčešće istican parametar je Ri broj. Njegova egzaktnost je pokazana prethodno u vezi s diskusijom rješenja Taylor-Goldsteinove jednadžbe. U procesu dijagnoze i prognoze turbulencije ovaj parametar ima veliki praktički nedostatak (Stanković, 1985). Naime finoća mjerenja meteoroloških parametara naročito po vertikali ima presudnu ulogu u praktičnom ocjenjivanju Ri broja kao indikatora turbulencije.

Poznato je da ova veličina u atmosferi varira u vrlo velikim granicama, od velikih negativnih do velikih pozitivnih vrijednosti. Teoretski, područje definicije vrijednosti Richardsonovog broja je $(-\infty, +\infty)$. Ove ekstremne vrijednosti se dobivaju kad smicanje vjetra iščekava. U tako velikom rasponu vrijednosti koje Ri broj može poprimiti u atmosferi sasvim je razumljivo da se zahtijeva velika preciznost mjerenja pri ocjenjivanju vrijednosti u vrlo uskom rasponu ($0 < Ri < 0.25$). Sva turbulencija uzrokovana smicanjem u statički stabilno stratificiranim slojevima atmosfere nalazi se u području gdje su ispunjene vrijednosti za Ri broj iz ovog intervala. Zbog toga, kod dijagnosticiranja i prognoziranja turbulencije pomoću ovog parametra, treba imati u vidu koliko netočnost mjerenja koja mogu proizvoditi male promjene u smicanju i stabilitetu mogu utjecati na odluku da li u nekom prostoru turbulencija egzistira ili ne. Pogreška u smicanju izaziva pogrešku na kvadrat u iznosu Ri broja. Kako se vidi iz relacije (4), priroda Ri broja sugerira istraživanje njegovih sastavnih komponenti: statičkog stabilneta $N^2(z)$ i vertikalnog smicanja vjetra dV/dz .

Da bi se dobile detaljnije informacije o onome što se zbiva u slojevima bure, u analiziranom slučaju računato je dodatno još čitav niz teorijski i empirijski utemeljenih indikatora turbulencije. Cilj računanja većeg broja različitih parametara je da se što preciznije definiraju područja s turbulencijom u buri, jer iz dosadašnjih proučavanja nije poznato koji od indikatora, u praksi, najsavršenije locira turbulenciju. U onim slojevima u kojima su se dobile vrijednosti Ri broja oko i ispod kritičnog detaljno su računati i analizirani indikatori:

- Brownova modifikacija dijagnostičke tendencije Ri broja:

$$\Phi_m \approx d/dt (\ln Ri) \approx (\xi_a + Ds^2 + Dt^2)^{1/2}, \quad (6)$$

gdje je $\xi_a = dv/dx - du/dy + f$ apsolutna vrtložnost, f je Coriolisov parametar, $Ds = du/dy + dv/dx$ je deformacija smicanja, $Dt = du/dx - dv/dy$ deformacija rastezanja. Ovaj parametar je korišten u dijagnozi i prognozi CAT-a (Stanković, 1985, 1986). Φ_m daje indicaciju o potencijalnom razvoju deformacijskih procesa velike skale koji su sposobni mijenjati Ri broj u pravcu opadanja ispod kritične vrijednosti ili u pravcu porasta Ri iznad kritične vrijednosti. Velike vrijednosti Φ_m značavaju područja u kojem se dinamički procesi odvijaju u pravcu opadanja Ri broja, tj. u pravcu rasipanja kinetičke energije u

turbulenciju. Drugim riječima, to znači da Φ_m može dati kvantitativnu indikaciju o potencijalnom porastu amplituda gravitacijskih smicajućih valova što će se reflektirati kroz opadanje Ri broja ispod kritičnog. U momentu kada dođe do loma valova i rasipanja njihove energije u turbulentnu, Φ_m počinje padati i na taj način indicirati porast Ri broja iznad kritičnog. To ukazuje na odvijanje procesa suprotno razvoju valova velike amplitude i njihovog loma u turbulenciju. Velika je prednost Φ_m parametra u njegovoj prognostičkoj sposobnosti. Tendencija opadanja ili porasta vrijednosti Ri broja može se dobiti iz aktualnih podataka o polju vjetra jer Φ_m kvantitativno, za razliku od Ri broja koji je samo kvalitativna mjera, određuje potencijalna turbulentna područja. Velike vrijednosti Φ_m dobivene iz aktualnih podataka vjetra indiciraju trend stvaranja ili uništenja turbulencije, što se izražava trendom opadanja ili rasta vrijednosti Ri broja zavisno da li se dobivaju velike ili male vrijednosti za Φ_m u određenim slojevima. U stvarnosti se radi o razvoju deformacijskih procesa na velikoj skali u pravcu pribavljanja ili oduzimanja energije potrebne za razvoj turbulencije.

Vertikalni tok kinetičke energije:

$$dEk/dz = d/dz (V^2/2) = V(dV/dz) \quad (7)$$

kao i kombinacija vertikalnog smicanja i deformacije polja vjetra

$$Sv \times DEF = (dV/dz) \times (Ds^2 + Dt^2)^{1/2} \quad (8)$$

računati su s ciljem da se dobije što više informacija o turbulenciji u slojevima bure jer se vjeruje da u području turbulencije zbog pojačanog rasipanja energije dolazi do povećanja vertikalnog toka energije. Deformacijski procesi u horizontalnim slojevima u kombinaciji s vertikalnim smicanjem vjetra u formi (8) trebaju i prema iskustvu dati indikaciju o turbulenciji ako su njihovi iznosi veći od kritičnih za određenu debljinu sloja. Kao dodatni parametri ove veličine korisno mogu poslužiti u dijagnosticiranju turbulentnih zona.

4. METODE ANALIZE I DISKUSIJA REZULTATA

Dana 7. 3. 1982 za vrijeme ALPEX SOP izmjerena je turbulencija specijalno opremljenim avionom u slojevima ispod 4 km, za vrijeme dok je bila jaka bura na sjevernom Jadranu. Iz podataka koje je prezentirao Smith uočava se da je najjača turbulencija u prijepodnevnim satima (otprilike od 08 do 12 GMT kada su letili avioni) bila u najnižim slojevima ispod 2 km. Zona izmjerene turbulencije, kako se može uočiti iz prikaza, izvršno koincidira s područjima maksimalnih uzlaznih i silaznih strujanja. To je ujedno područje gdje je potpuno bio čist zrak, gdje nije bilo oblaka.

U cilju dijagnoze turbulencije iz distribucije turbulentnih parametara korišteni su radio-sondažni podaci stanica: Pule, Zadra, Karlovca i Zagreba. Iz ovih podataka formirana su ulazna polja vjetra i temperature (u , v , T) u mreži točaka 35 x 35 km, za svakih 50 hPa, od 950 do 600 hPa u terminima 03, 09 i 12 UTC. Izabrani termini pokrivaju vrijeme avionskih opservacija turbulencije. Mreža u kojoj su računati parametri turbulencije pokriva

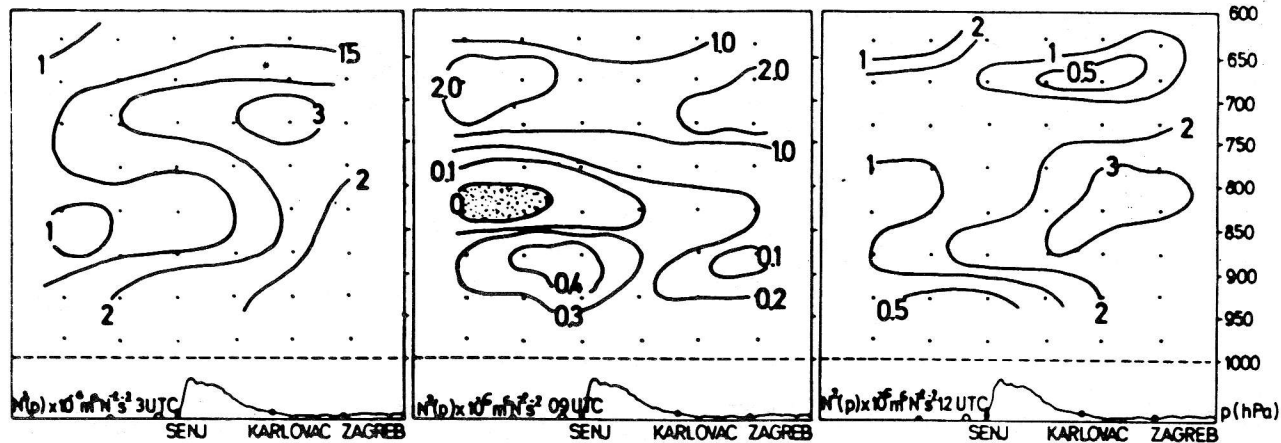
područje zapadnog dijela Jugoslavije. Turbulentni parametri su računati za sve slojeve i sve termine tako da se mogla uočiti određena karakteristična raspodjela vrijednosti ovih parametara. Koncentracija kritičnih vrijednosti većine parametara zapažena je u područjima gdje je turbulencija opažena iz aviona. Iz osrednjenih horizontalnih polja parametara turbulencije koja se odnose na sredinu slojeva debljine 50 hPa napravljeni su vertikalni presjeci Zagreb-Karlovac-Senj za svaku od analiziranih veličina (sl. 1, 2, 3, 4).

Može se konstatirati da je atmosfera u svim analiziranim slojevima bila statički stabilna $N^2(p) > 0$. Dakle, $N(p)$ je realna funkcija za sve analizirane slojeve i sve termine izuzev samo jednog malog dijela u sloju 850-800 hPa za 09 UTC. U tom području $N(p)$ nije bio realan, što znači da je u tom djelu bio moguć razvoj konvektivne turbulencije, $N^2(p) < 0$, (sl. 1). Raspodjela vertikalnog smicanja vjetra u vertikalnom presjeku (sl. 2) prikazuje povećanje vrijednosti $Sv(z)$ u onim područjima u kojima istovremeno uočavamo opadanje vrijednosti $N^2(p)$ na slici 1. Znatno opadanje statičkog stabiliteta u sloju 850-800 (sl. 1) vjerovatno je uzrokovano pojačanim smicanjem vjetra $Sv \geq 15 \times 10^{-3} s^{-1}$ iznad kritične vrijednosti ($7.5 \times 10^{-3} s^{-1}$) (sl. 2), što je rezultiralo smanjenjem vrijednosti Ri broja ispod kritične ($Ri \leq 0.25$) za KHN (sl. 3).

Richardsonov broj je manji od kritične vrijednosti za lom gravitacijskih valova, tj. za razvoj Kelvin-Helmholtzove nestabilnosti. U tim područjima (zasjenjena područja na slikama) prema egzaktnom indikatoru turbulencije postojali su realni uvjeti za lom gravitacijskih valova i za rasipanje energije u turbulenciju. Premda je Ri broj vrlo osjetljiv na vertikalnu rezoluciju meteoroloških parametara atmosfere, i s obzirom na činjenicu da se iz sondažnih mjerenja teško postiže zadovoljavajuća točnost u procjeni Ri broja, ipak je u analiziranom slučaju dobivena distribucija Ri broja koja omogućava dijagnozu turbulencije na bazi teorije. Činjenica je da se u turbulentnim slojevima odvija neprestano narušavanje ravnoteže između smicanja koje pribavlja energiju koja se pretvara u turbulenciju i stabiliteta koji tu energiju troši. Kada se smicanjem pribavi dovoljno energije da se savlada postojeći lokalni statički stabilitet i da još preostane suvišak energije za razvoj turbulencije, što se u analiziranom slučaju odražava na povećanje vrijednosti dijagnostičke tendencije Ri broja Φ_m u vertikalnim presjecima na slici 4.

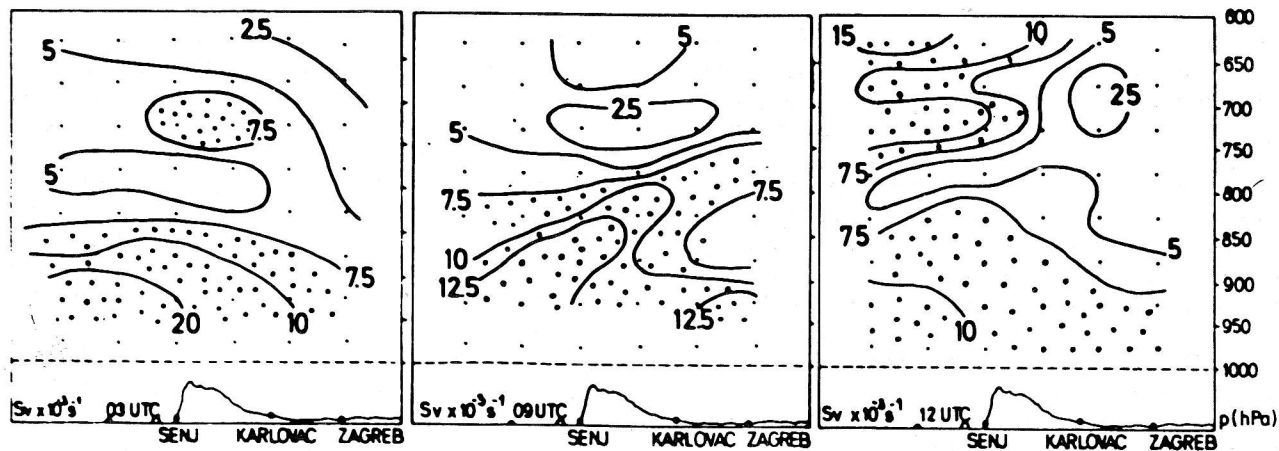
Iz distribucije stabiliteta, smicanja, Ri broja i tendencije Ri broja u vertikalnim presjecima može se konstatirati da su kritične vrijednosti ovih parametara skoncentrirane u područjima gdje je opservirana turbulencija (Smith, 1987).

Interesantno je pogledati horizontalnu raspodjelu parametara turbulencije u slojevima i terminima u kojima su bile prekoračene kritične vrijednosti za Ri broj i Φ_m . Slike 5, 6, 7 i 8 prikazuju polja indikatora (4), (6), (7) i (8) u mreži točaka za one slojeve koji su bili s najizraženijom turbulencijom, tj. u kojima je Ri broj dostigao najnižu vrijednost i Φ_m najvišu vrijednost. Distribucija ovih parametara u vertikalnom presjeku lako se može usporediti s presjekom kojeg je dao Smith za istu situaciju. Iz vertikalnih presjeka za različite parametre i u različitim terminima moguće je ustvrditi da se lokacija turbulencije



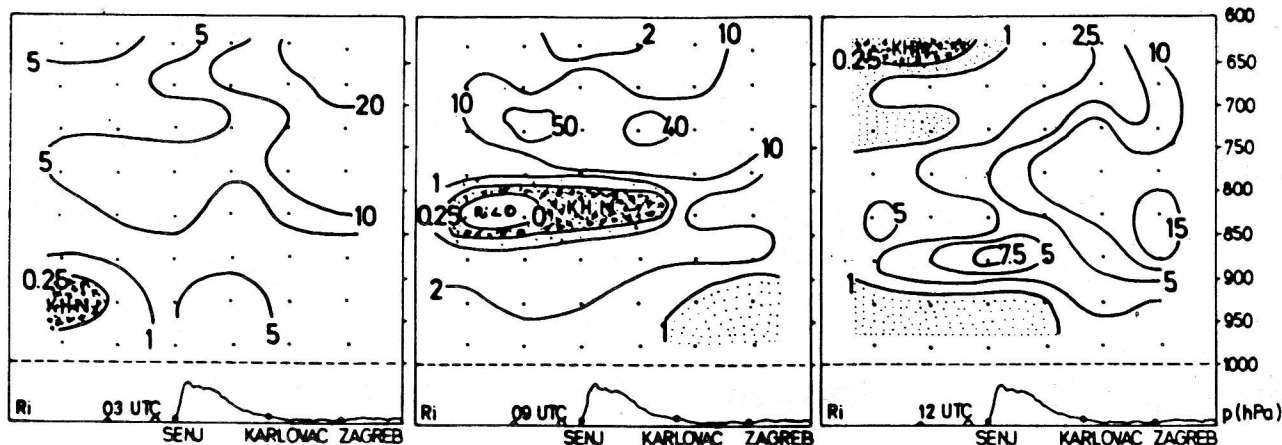
Sl. 1. Vertikalni presjek statičkog stabilneta $N^2(p)$ u jedinicama ($10^{-6} m^6 N^{-2} s^{-2}$), računat preko slojeva debljine $\Delta p=50$ hPa za 7. 3. 1982 u 03⁰⁰, 09⁰⁰ i 12⁰⁰ UTC.

Fig. 1. Vertical cross-section of static stability $N^2(p)$ in units ($10^{-6} m^6 N^{-2} s^{-2}$) evaluated across $\Delta p=50$ hPa layer thickness for 7.3. 1982 at 03⁰⁰, 09⁰⁰ and 12⁰⁰ UTC.



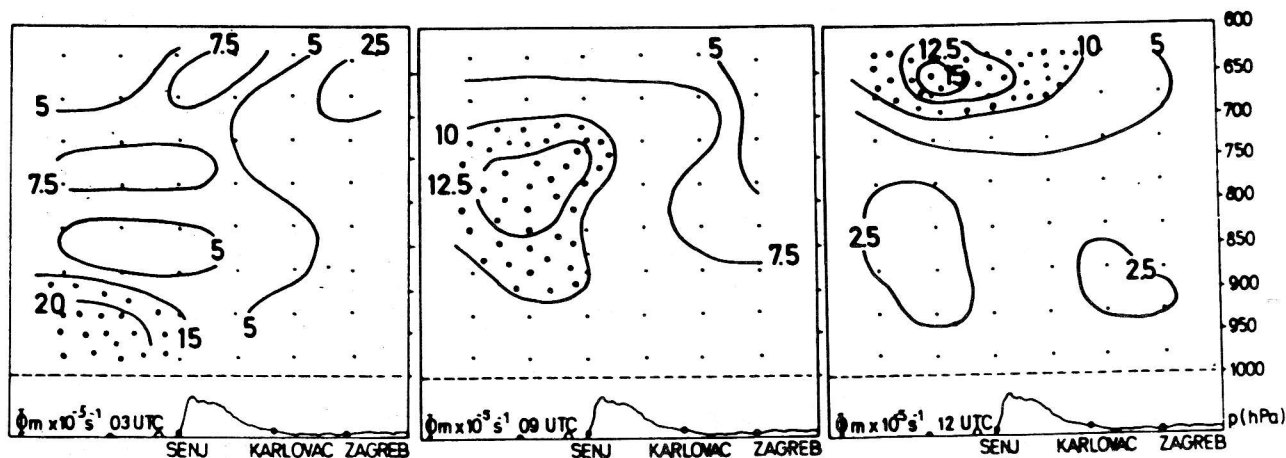
Sl. 2. Vertikalni presjek vertikalnog smicanja vjetra S_v u jedinicama ($10^{-3} s^{-1}$), računat preko slojeva debljine $\Delta p=50$ hPa za 7. 3. 1982. u 03⁰⁰, 09⁰⁰ UTC i 12⁰⁰ UTC.

Fig. 2. Vertical cross-section of vertical wind shear S_v in units ($10^{-3} s^{-1}$) evaluated across $\Delta p=50$ hPa layer thickness for 7.3. 1982 at 03⁰⁰, 09⁰⁰ and 12⁰⁰ UTC.



Sl. 3. Vertikalni presjek Richardsonovog broja (R_i) računat za slojeve debljine $\Delta p = 50$ hPa za 7. 3. 1982. u 03⁰⁰, 09⁰⁰ UTC i 12⁰⁰ UTC.

Fig. 3. Vertical cross-section of Richardson number (R_i), evaluated across $\Delta p=50$ hPa layer thickness for 7.3. 1982 at 03⁰⁰, 09⁰⁰ and 12⁰⁰ UTC.



Sl. 4. Vertikalni presjek dijagnostičke tendencije Ri broja Φ_m u jedinicama ($10^{-5} s^{-1}$), računane za slojeve debljine $\Delta p=50$ hPa za 7. 3. 1982. u 03⁰⁰, 09⁰⁰ 12⁰⁰ UTC.

Fig. 4. Vertical cross-section of diagnostic Richardson number tendency (Φ_m) in units ($10^{-5} s^{-1}$) evaluated across $\Delta p=50$ hPa layer thickness for 7.3. 1982 at 03⁰⁰, 09⁰⁰ and 12⁰⁰ UTC.

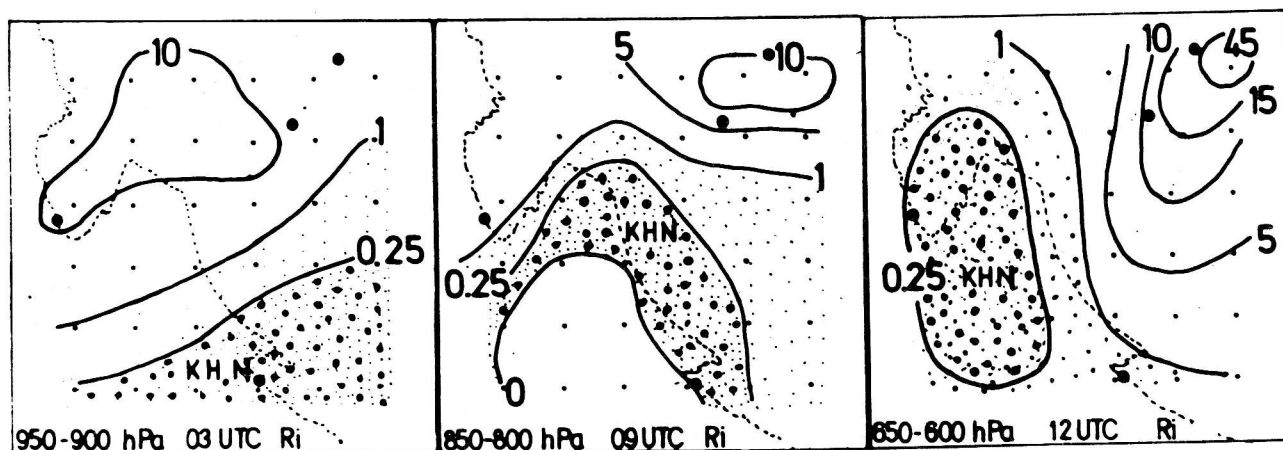
mijenjala od nižih slojeva u rano jutro (03 UTC) prema višim slojevima, idući prema podnevu. Ipak najjača turbulencija koja je zahvaćala najveće područje prema dobivenim podacima dogodila se u 09 UTC u sloju 850-800 hPa.

Ovdje treba istaći da zbog mogućnosti pogreške uzrokovane pravljenjem ulaznih polja, i naročito greške zbog prevelike debljine sloja preko koje se računaju smicanje i stabilitet, turbulencija se može očekivati i u zonama većih vrijednosti Ri . Uobičajeno je da se već kod vrijednosti $Ri \leq 1$ uzima da se može pojaviti turbulencija kada se Ri procjenjuje iz sondažnih podataka za slojeve veće debljine od 100 m.

Kada bismo zasjenjena područja na slikama 3 i 4, u različitim terminima (03, 09 i 12 UTC), složili u jednu sliku, mogli bismo konstatirati da se turbulencija, prema indikaciji Ri i Φ_m , u prijedopodnevnom satima, dok su letili avioni, mogla dijagnosticirati na približno istom mjestu,

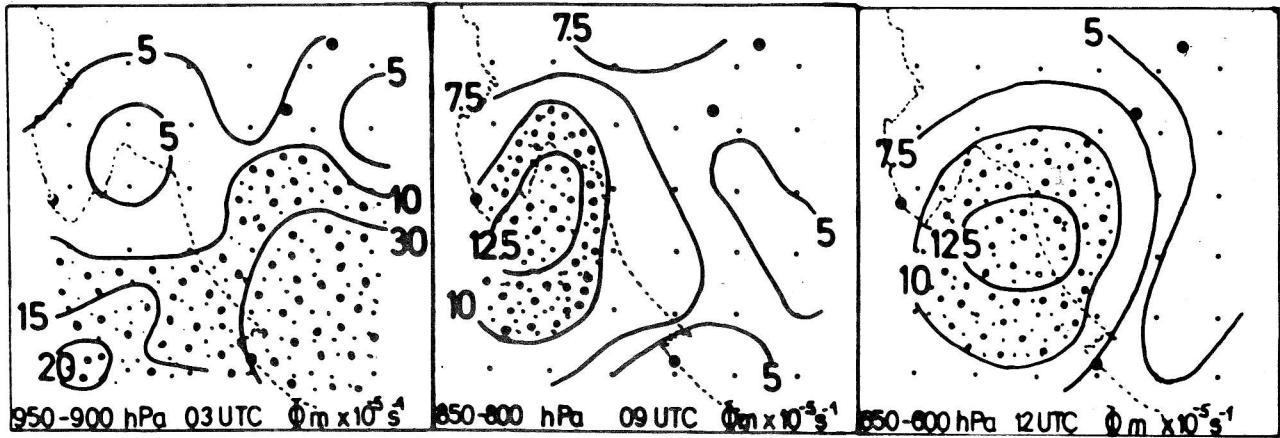
na kojem je Smith označio područje turbulencije izvedeno iz avionskih mjerenja. Iz radio sondažnih podataka Pule (Sl. 9) i Zadra (Sl. 10) računati su parametri turbulencije Ri broj, smicanje, statički stabilitet i vertikalni tok kinetičke energije za slojeve debljine 500 m, od visine 500 m iznad tla do 5.5 km, s ciljem da se barem iznad ovih stanica dobiju detaljniji podaci o raspodjeli turbulentnih slojeva. Za termin 06 UTC nedostajali su podaci Pule tako da su za Zadar promjene računane svaka tri sata od 03 do 12 UTC, a za Pulu su računati svi ovi termini osim 06 UTC.

Iz slika 9 i 10 mogu se uočiti slojevi iznad ove dvije stanice u kojima je egzistirala K H N. Kako je debljina slojeva bila iznad teorijski zahtijevane, područja s turbulencijom se mogu očekivati i kod vrijednosti Ri većih od 0.25. Na slikama su svi slojevi u kojima je Ri bio manji od jedinice zasjenjeni i označeni kao slojevi u kojima je vjerovatno bila non-konvektivna turbulencija.



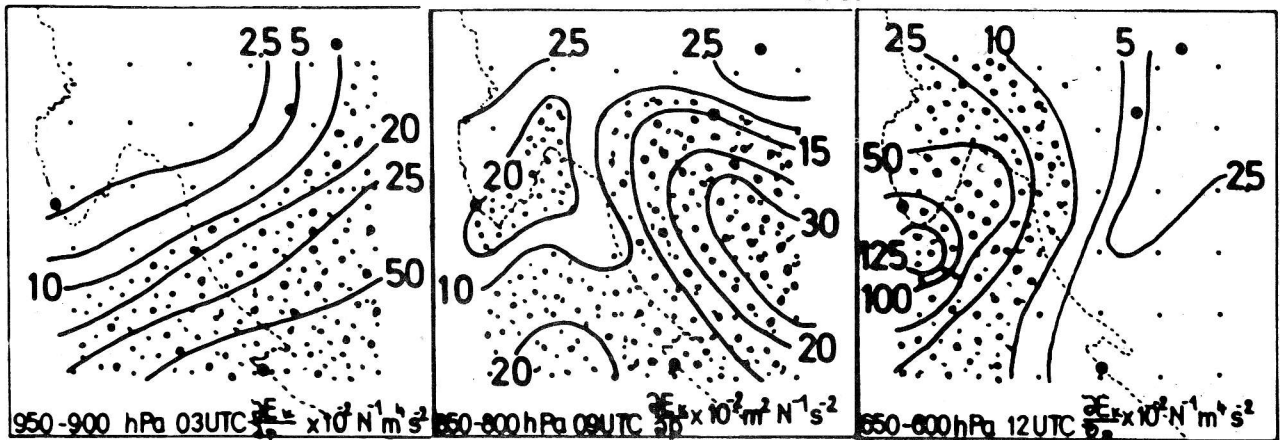
Sl. 5. Polje Richardsonovog broja za 7. 3. 1982. računato za slojeve 950-900 hPa u 03⁰⁰, 850-800 hPa u 09⁰⁰ UTC i 650-600 hPa u 12⁰⁰ UTC.

Fig. 5. Field of Richardson number for 7.3. 1982 evaluated between 950-900 hPa at 03⁰⁰ UTC, 850-800 hPa at 09⁰⁰ UTC and 650-600 hPa at 12⁰⁰ UTC.



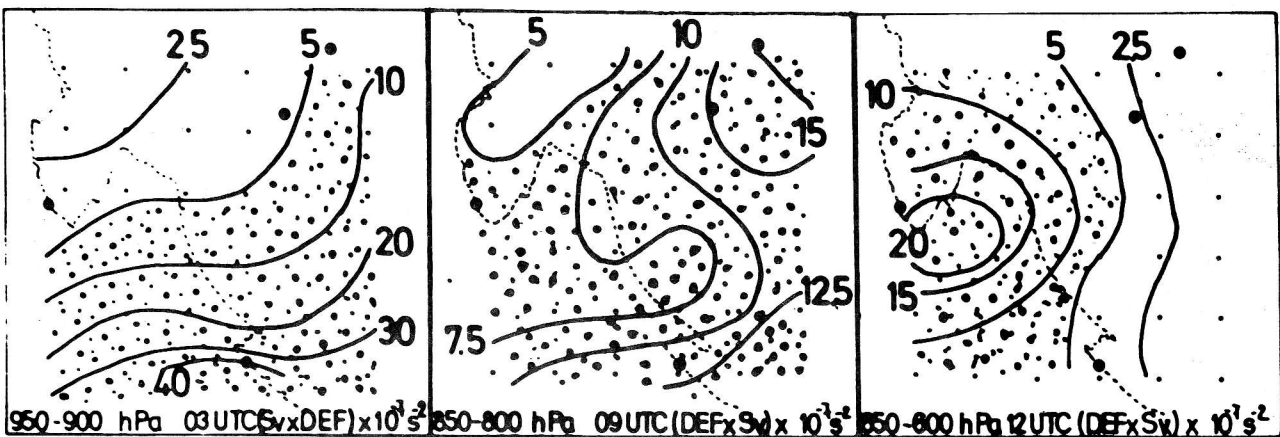
Sl. 6. Polje Φ_m u jedinicama ($10^{-5}s^{-1}$) za 7. 3. 1982. računato u slojevima 950-900 hPa u 03⁰⁰ UTC, 850-800 hPa u 09⁰⁰ UTC i 650-600 hPa u 12⁰⁰ UTC.

Fig. 6. Field of Φ_m in units ($10^{-5}s^{-1}$) for 7. 3. 1982 evaluated between 950-900 hPa at 03⁰⁰ UTC, 850-800 hPa at 09⁰⁰ UTC and 650-600 hPa at 12⁰⁰ UTC.



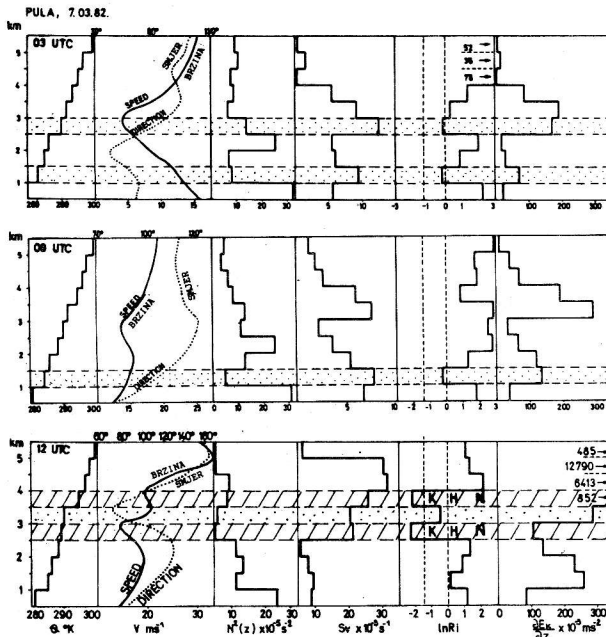
Sl. 7. Polje produkata vertikalnog smicanja vjetrova i deformacije ($Sv \times DEF$) u jedinicama ($10^{-7}s^{-3}$) za 7. 3. 1982. računato u slojevima 950-900 hPa u 03⁰⁰ UTC, 850-800 hPa u 09⁰⁰ UTC i 650-600 hPa u 12⁰⁰ UTC.

Fig. 7. Field of products of vertical wind shear and deformation ($Sv \times Def$) in units ($10^{-7}s^{-3}$) for 7. 3. 1982. evaluated between 950-900 hPa at 03⁰⁰ UTC, 850-800 hPa at 09⁰⁰ UTC and 650-600 hPa at 12⁰⁰ UTC.



Sl. 8. Polje vertikalnog toka kinetičke energije dEk/dp u jedinicama ($10^{-2}N^2m^4s^{-2}$) za 7. 3. 1982. kroz slojeve 950-900 hPa u 03⁰⁰ UTC, 850-800 hPa u 09⁰⁰ UTC i 650-600 hPa u 12⁰⁰ UTC.

Fig. 8. Field of vertical flow of kinetic energy dEk/dp in units ($10^{-2}N^2m^4s^{-2}$) for 7. 3. 1982 across layers 950-900 hPa at 03⁰⁰ UTC, 850-800 hPa at 09⁰⁰ UTC and 650-600 hPa at 12⁰⁰ UTC.



Sl. 9. Potencijalna temperatura (θ) u ($^{\circ}$ K), brzina vjeta u (ms^{-1}), smjer vjeta u stupnjevima ($0-360^{\circ}$), statički stabilitet $N^2(z)$ u jedinicama (10^{-5}s^{-2}), vertikalno smicanje vjeta (Sv) u jedinicama (10^{-3}s^{-1}), Richardsonov broj u obliku prirodnog logaritma ($\ln Ri$) i vertikalni tok kinetičke energije (dEk/dz) u jedinicama (10^{-3}ms^{-2}) na dan 7. 3. 1982. u 03° , 09° i 12° UTC, računati za slojeve debljine 500 m iznad Pule.

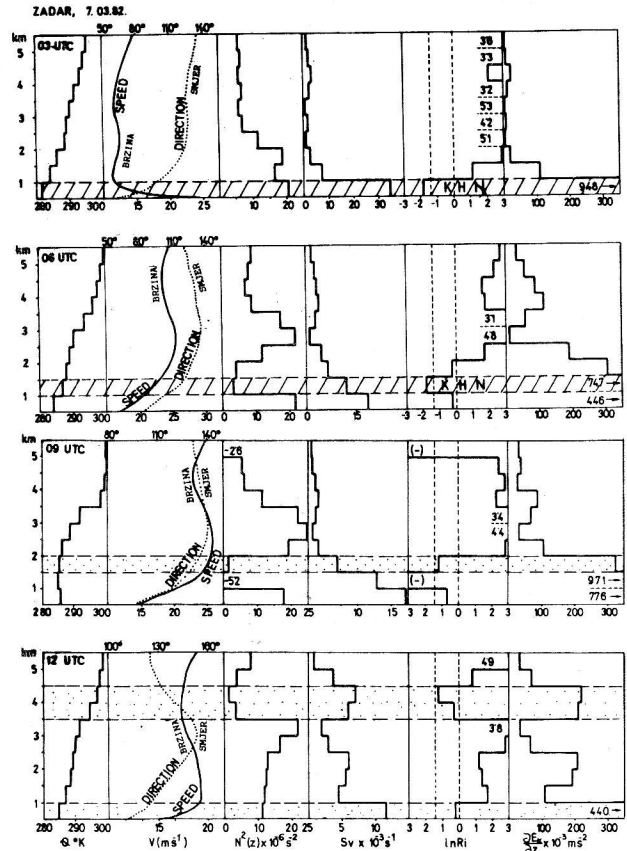
Fig. 9. Potential temperature (θ) in ($^{\circ}$ K), wind speed in (ms^{-1}) and direction ($0-360^{\circ}$), static stability $N^2(z)$ in units (10^{-5}s^{-2}), vertical wind shear (Sv) in units (10^{-3}s^{-2}), Richardson number (Ri) as natural logarithm ($\ln Ri$), vertical flow of kinetic energy (dEk/dz) in units (10^{-3}ms^{-2}) evaluated across 500 m layer thickness for 7. 3. 1982 at 03° , 09° and 12° UTC over Pula.

Interesantno je primijetiti kako vrijednosti parametara turbulencije jako variraju od sloja do sloja što zapravo govori o zamršenoj raspodjeli turbulencije u slojevima bure.

Konstatacija da turbulencije ima iznad određene točke, ne znači da turbulencije ima u svim slojevima i da je jednakog intenziteta, što se može ustanoviti i pomoću vertikalnog toka kinetičke energije kroz pojedine slojeve koji znatno varira od sloja do sloja.

5. ZAKLJUČCI

Rezultati dijagnoze opserviranog slučaja turbulencije bure od 7. 3. 1982. iz ALPEX SOP pokazali su da je ideja započeta u ovom radu u osnovi korektna. Konceptija se sastojala u tome da se usvoji da je turbulencija bure



Sl. 10. Potencijalna temperatura (θ) u ($^{\circ}$ K), brzina vjeta u (ms^{-1}), smjer vjeta u stupnjevima ($0-360^{\circ}$), statički stabilitet $N^2(z)$ u jedinicama (10^{-5}s^{-2}), vertikalno smicanje vjeta (Sv) u jedinicama (10^{-3}s^{-1}), Richardsonov broj u obliku prirodnog logaritma ($\ln Ri$) i vertikalni tok kinetičke energije (dEk/dz) u jedinicama (10^{-3}ms^{-2}) na dan 7. 3. 1982. u 03° , 06° , 09° i 12° UTC, računati za slojeve debljine 500 m iznad Zadra.

Fig. 10. Potential temperature (θ) in ($^{\circ}$ K), wind speed in (ms^{-1}) and direction ($0-360^{\circ}$), static stability $N^2(z)$ in units (10^{-5}s^{-2}), vertical wind shear (Sv) in units (10^{-3}s^{-2}), Richardson number (Ri) as natural logarithm ($\ln Ri$), vertical flow of kinetic energy (dEk/dz) in units (10^{-3}ms^{-2}) evaluated across 500 m layer thickness for 7. 3. 1982 at 03° , 06° and 12° UTC over Zadar.

uzrokovana "pucanjem" amplitude gravitacijskih smicajućih valova malih valnih duljina, odnosno Kelvin-Helmholtzovom nestabilnošću, i u tome da su informacije o tim, K H N procesima, sadržane u određenim parametrima mezo i sinoptičke skale.

Usvajajući ovo, u odabiru indikatora turbulencije bure, primjenjeni su rezultati valne teorije i djelomično iskustva iz istraživanja CAT-a.

Na toj osnovi napravljena je dijagnoza jednog slučaja turbulencije bure koji je zabilježen u vedrom zraku u slojevima ispod 4 km za vrijeme bure na sjevernom Jadranu (Smith, 1987). Prema Smith-ovoj prezentaciji, sva turbulencija toga dana dogodila se u području najintenzivnijih uzlaznih i silaznih strujanja u zavjetrini dinarskog sistema.

Raspodjela potencijalne temperature i vjetra po visini koju smo dobili iz sondažnih mjerenja pokazala je da su slojevi bure toga dana bili statički stabilni s izraženim vertikalnim smicanjem vjetra. Poremećenja vertikalne brzine, zabilježena u područjima maksimalne turbulencije kao posljedica smicanja vjetra u statički stabilnom zraku, matematički su formulirana u Taylor-Goldsteinovoj (T-G) jednadžbi.

Kako je poznato, na stabilno stratificirane fluide sa smicanjem, u okviru linearne aproksimacije, primjenjuje se valna teorija. To je u ovom radu učinjeno na slučaju turbulencije bure jer su prema rezultatima mjerenja ispunjeni uvjeti da je fluid stabilno stratificiran i da egzistira vertikalno smicanje vjetra.

Ne ulazeći u detalje diskusije uzroka ovakve stratifikacije turbulencije bure, lociranje turbulencije u ovom radu izvedeno je iz distribucije indikatora proizašlih egzaktno iz valne teorije, i djelomično iz iskustva. Superkritične vrijednosti na taj način dobivenih indikatora su se skoncentrirale u onim slojevima u kojima je turbulencija, prema prikazu Smith-a, realno postojala.

Ovakvi rezultati su dosta ohrabrujući i daju nadu da se turbulencija povezana s burom može objektivno dijagnosticirati i prognozirati ako je na raspolaganju adekvatna prostorna i vremenska rezolucija mjerenih i prognoziranih polja vjetra i temperature. Potrebno je ovdje istaći da se u sinoptičkoj praksi obično ne raspolaze podacima ovako fine rezolucije koja je bila na raspolaganju za ovo ispitivanje.

Rezultati dobiveni u ovom radu govore u prilog postavljenoj tezi i predstavljaju, nadamo se, solidnu bazu za dalje proučavanje turbulencije u buri na ovdje započetim osnovama.

LITERATURA

- Brown, R., 1973: New indices to locate clear air turbulence, *Met. Mag.* 102, 347-361.
- Crook, N. A., 1984: Trapping of low-level internal gravity waves, *J. Atmos. Sci.*, 45, 1533-1541.
- Einaudi, F., D. P. Lalas and G. E. Perona, 1978/79: The role of gravity waves in tropospheric processes, *Pure Appl. Geophys.* 117, 627-308.
- Gossard, E. E. and W. H. Hooke, 1975: *Waves in the atmosphere*, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, Oxford, New York, 440 pp.
- Klemp, J. B., and D. K. Lilly, 1975: The dynamics of wave-induced downslope winds, *J. Atmos. Sci.*, 32, 320-339.
- Lalas, P. D., F. Einaudi and D. Fua, 1976: The destabilizing effect of the ground on Kelvin-Helmholtz waves in the atmosphere, *J. Atmos. Sci.*, 33, 59-69.
- Metcalf, J. I., 1975: Microstructure of radar echo layers in clear atmosphere, *J. Atmos. Sci.*, 32, 362-370.
- Merrill, J. T., 1977: Observational and theoretical study of shear instability in the airflow near the ground, *J. Atmos. Sci.*, 34, 911-921.
- Smith, R. B., 1985: On severe downslope winds, *J. Atmos. Sci.*, 42, 2598-2603.
- Smith, R. B., 1987: Aerial observations of the Yugoslavian bora, *J. Atmos. Sci.*, 44, 269-297.
- Stanković, K., 1985: Turbulencija u vedrom zraku i mogućnosti dijagnosticiranja i prognoziranja na osnovi dinamičkih veličina sa sinoptičke skale, magistarski rad, Sveučilište u Zagrebu, 111 str.
- Stanković, K., 1985a: The possibilities to diagnose clear air turbulence on the basis of dynamic magnitudes from the synoptic scale, XII Inter. Conference for Carpathian meteorology, Belgrade, October 1985 Zbornik meteoroloških i hidroloških radova, 12, 54-57.
- Stanković, K., 1987: Turbulencija u vedrom zraku iznad Jadrana, III Savjetovanje o elementarnim atmosferskim nepogodama "Opasne pojave na moru", 16-18, Dec. 1987, 54-63 str.
- Stanković, K., 1988: The investigation of characteristics of bora turbulence by means of dynamic parameters from the synoptic scale, XX Inter. Conference for Alpine Meteorology, 18-25, Sept. 1988, Sestola, Italija (in print).

SUMMARY

This paper considers the possibility of diagnosing and forecasting bora turbulence apparently caused by Kelvin-Helmholtz instability. It was supposed that the dissipation of kinetic energy into bora turbulence is reflected in some synoptic scale parameters usually used as clear air turbulence indicators.

This consideration is based on both the observed bora turbulence characteristics and some theoretical results of the turbulence in stable stratified fluid with shear.

In the ALPEX SOP case of 7 March 1982 bora turbulence was observed above northern Adriatic regions where the atmosphere was statically stable with a strong vertical wind shear. All moderate and severe turbulence encountered by the aircraft roughly coincided with the maximum vertical velocity. The turbulence was found in clear air. This fact was the principal reason for the application of wave theory for diagnosing of the bora turbulence.

The input fields of wind and temperature were obtained from the sounding data of Pula, Zadar, Karlovac and Zagreb in the grid point network of 35 x 35 km which covers the western part of Yugoslavia. For each 50 hPa thickness from 950-600 hPa at 03, 09 and 12 UTC from these fields the following parameters were computed: the Richardson number, Brown's modification of diagnostic Richardson number tendency, vertical wind shear, vertical flow of kinetic energy, some combination of vertical wind shear and deformation and static stability. Although all these parameters contain the wind speed, wind shear and static stability they do not reflect equally well the observed turbulence. Some of them give more information on the turbulence intensity whereas the others (like the Ri number) serve only qualitatively as turbulence indicators.

The turbulence regions were identified by supercritical values of these parameters which have shown well agreement with the observed turbulence presented by Smith (1987) in this case.