

ODREĐIVANJE LOKACIJE I INTENZITETA TURBULENCIJE BURE

Determinantion of Bora Turbulence Location and Intensity

KATARINA STANKOVIĆ

Savezna Uprava za kontrolu letenja
Zrakoplovni meteorološki centar, aerodrom Zagreb
Primljeno 4. travnja 1990, u konačnom obliku 25. svibnja 1990.

Sažetak: Učinjen je pokušaj određivanja lokacije i intenziteta turbulencije bure iz polja empiričkog indeksa za situaciju 07.03.1982. godine iz podataka ALPEX-SOP nad zapadnim područjem Jugoslavije. Osnovna je pretpostavka od koje se polazi da je turbulencija pri buri generirana Kelvin-Helmholtzovom nestabilnošću i da je stoga ovu vrstu turbulencije moguće locirati i prognozirati pomoću indikatora i prediktora turbulencije vedroga zraka. Također se pretpostavlja da je intenzitet ove vrste turbulencije moguće odrediti na osnovi indikatora intenziteta CAT-a. Jedan od takvih indikatora je empirički indeks E kojega je izveo Dutton (1980) multiplom linearnom regresionom analizom. Rezultati pokazuju slaganje sa avionski izmjerenom turbulencijom bure kako je prezentirao Smith (1987).

KLjučne riječi: turbulencija bure, Kelvin-Helmholtzova nestabilnost, gravitacijski smicajući valovi.

Abstract: This paper considers the possibility of determining bora turbulence intensity from the fields empirical index derived by Dutton as the "best" CAT indicator. The reason for such an analysis lies in the fact that bora turbulence have probably the same or similar physical mechanism of generation as clear air turbulence. The attempt to locate bora turbulence shows good coincidence with observed bora turbulence and turbulence located by the empirical index.

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

1. UVOD

Problem nastanka i održavanja smicanjem generirane turbulencije u stratificiranim fluidima, u atmosferi i oceanu, predstavlja veliki znanstveni, teorijski i eksperimentalni izazov.

Saznanja o fizici turbulentnih procesa u atmosferi porasla su u posljednje vrijeme zbog općenitog trenda povećanja interesa u proučavanju mezo i mikro meteoroloških procesa i pojava.

Tome je svakako doprinjeo razvoj tehnike opserviranja, kao što su akustički radari, elektromagnetski radari i lidari koji su učinili mogućim istraživanje planetarnog graničnog sloja, troposfere, stratosfere i viših slojeva. Također, konstrukcija instrumentima dobro opremljenih meteoroloških tornjeva omogućila je detaljnu analizu smicanjem inducirane turbulencije u graničnom sloju atmosfere. Turbulencija generirana smicanjem u stabilno stratificiranom fluidu također je ustanovljena i u oceanu u zoni termokline.

Veoma važna motivacija za istraživanja u ovom području su problemi koje turbulencija izaziva u avijaciji i brodarstvu. Uprkos mnogim znanstvenim spoznajama do kojih se došlo u teorijskim proučavanjima iz fizike fluida, u novije

vrijeme i numeričkim simulacijama ovih procesa, još uvijek se veoma malo znade o praktičnim aspektima ovog problema koji imaju veliku primjenu u osiguravanju zračnog saobraćaja. Zbog praktičkog i teorijskog značaja ove vrste turbulencije u posljednjih desetak godina u svjetskoj literaturi se osjeća veoma velik porast teorijskih i numeričkih proučavanja turbulencije u svim slojevima atmosfere, od najnižih u planetarnom graničnom sloju do vrlo visokih slojeva stratosfere. Problem nekonvektivne turbulencije, kojem pripada turbulencija vedrog zraka, proučavan je s raznih aspekata; simuliranjem procesa u laboratorijima, numeričkim simulacijama, studiranjem analitičkih rješenja jednadžbi koje opisuju procese u stabilnom fluidu sa smicanjem i niz drugih eksperimentalnih istraživanja u atmosferi i oceanu koja su doprinjela saznanjima o ovim procesima u cilju njihove dijagnoze i prognoze koje imaju veliku aplikaciju u zrakoplovstvu. Sva su ova proučavanja do danas rezultirala saznanjima da se turbulencija stabilno stratificiranih smicajućih fluida može fizikalno objasniti pomoću Kelvin-Helmholtzovih valova koji se s vremena na vrijeme degeneriraju u tzv. K-H "vrtloge", ili kako se oni često u literaturi originalno nazivaju "billows". Na mjestima gdje se pojavljuju "billows" pojavljuje se turbulencija koja je u biti posljedica rasipanja kinetičke energije zbog "pucanja"

velike amplitude K-H valova. Ova pojava se javlja sporadično u obliku "mrlja", tj. "patches of turbulence". Radari visoke snage dobro detektiraju ove "mrlje turbulencije" kao i K-H valove, što je i omogućilo stvaranje ispravne fizikalne slike o turbulenciji. Kompletan životni ciklus nastanka i razvoja turbulencije u smicajućoj stabilnoj atmosferi, tj. životni ciklus Kelvin-Helmholtzovih valova i prijelaza u "billows", odnosno u turbulenciju, bio je po prvi put radarom detektiran i prezentiran u radu Atlas at all (1970). Kasnija istraživanja su ovu sliku upotpunila i potvrdila, tako da danas imamo jasnu predstavu o strukturi i karakteristikama ove vrste turbulencije.

Međutim, kad se radi o svakodnevnoj praksi i mogućnostima dijagnosticiranja i prognoziranja ovog fenomena, javljaju se nepremostivi problemi koji u osnovi glavni izvor imaju u neskladu između vremenske i prostorne skale na kojoj se javlja turbulencija i skale na kojoj se vrše visinska mjerenja parametara atmosfere koji su nužni za lociranje turbulencije. Taj problem nije jednostavno rješiv iz razloga što se istraživanja trebaju provoditi simultano. Dakle istovremeno je potrebno imati opserviranu turbulenciju i adekvatnu gustoću sondažnih mjerenja koja bi omogućivala istraživanje sposobnosti raznih dinamičkih parametara i njihovih raznih kombinacija kao mogućih turbulentnih prediktora.

U relativno mladoj meteorološkoj znanstvenoj historiji, a napose historiji turbulencije i njezinoj interakciji s avijacijom, nije bilo mnogo simultanih opservacija koje su nužna baza znanstvenicima za istraživanja turbulencije s ovog aspekta.

Iz tog razloga Projekt ALPEX koji je izveden i u području naše zemlje predstavlja vrlo dragocjen set podataka za ovakvu vrstu istraživanja, premda primarni cilj samog projekta nije bio istraživanje turbulencije. Kako su u SOP periodu pored sondažnih vršena i avionska mjerenja u određene dane u kojima je ustanovljena i turbulencija, to je poslužilo kao baza u ovom radu za istraživanje turbulencije u buri s jednog aspekta koji nije do sada bio u literaturi tretiran. To je pokušaj da se turbulencija bure odredi pomoću nekih već provjerenih teorijskih i empiričkih indikatora CAT-a.

U ovom proučavanju polazi se od hipoteze koja je primarno bila razmatrana u radu Stanković, 1988a, 1988b, da je turbulencija u buri uzrokovana lomom Kelvin-Helmholtzovih valova i da ima sličan ili isti fizikalni uzrok nastanka kao i turbulencija vedrog zraka. Činjenica je da je bura vjetar koji je jako lokalno izražen i orografija igra presudnu ulogu u manifestaciji intenziteta bure i s njom povezane turbulencije. Prilikom analize atmosferskih slojeva s burom ustanovljeno je da su slojevi pretežno stabilni statički i da u njima postoji vertikalno smicanje vjetra. Kako se turbulencija u najintenzivnijem obliku javlja u zavjetrini planinske prepreke, a što je kako ćemo vidjeti pokazalo i ovo istraživanje, sasvim je logično očekivati da su poremećaji koji su uzrokovani pribavljanjem energije sa velike skale dodatno intenzificirani deformiranjem strujanja planinskom preprekom, kao i miješanjem maritimnog toplijeg i kopnenog hladnijeg zraka. U tim procesima prirodno je da se u području bure stvara veliki broj slojeva s diskontinuiranim gustoćama i smicanjima u kojima se valni poremećaji različitih valnih duljina, bliskih dimenzijama K-H valova, vrlo brzo, zbog velikog dotoka energije, degeneriraju u nepravilna vrtložna gibanja koja su K-H "billows". Iz teorije

turbulencije vedrog zraka poznati su egzaktni kriteriji prijelaza laminarnog, tj. valnog u vrtložno, ili kako se to u literaturi često naziva, poremećaj sa velikom ali konačnom amplitudom valova. Egzaktni kriterij prijelaza valnog u turbulentno gibanje sadržan je u Richardsonovom broju, koji predstavlja omjer produkcije energije vertikalnim smicanjem i trošenja energije na održavanje stabilne stratifikacije. Kad god se više energije pribavlja nego se potroši, imamo turbulenciju u kojoj se višak energije rasipa i troši na rad koji vrši turbulencija.

U ovom istraživanju mi smo pošli od pretpostavke da se ovo rasipanje energije može reflektirati na iznosima onih indikatora turbulencije za koje je ustanovljeno da su reprezentanti te energije. U ovom slučaju mi smo upotrijebili jedan indikator koji je dobiven čisto empiričkim putem.

Određena potvrda korektnosti ovakvog pristupa turbulenciji bure sadržana je implicite u velikoj grupi radova koji s raznih aspekata proučavaju cijelu jednu klasu procesa koji su odgovorni za generiranje turbulencije u stratificiranim fluidima sa smicanjem, Merrill (1977), Einaudi et al. (1977), Davis and Peltier (1977), Klemp and Lilly (1975), Lester and Fingerhut (1974), Smith (1985) i drugi.

Činjenica je da je sva avionski ustanovljena turbulencija u buri za slučaj koji je ovdje analiziran bila u stabilno stratificiranom vedrom zraku u kojem je egzistiralo snažno vertikalno smicanje vjetra. Poznato je da se CAT javlja u stabilno stratificiranom fluidu gdje istovremeno postoji superkrično vertikalno smicanje vjetra.

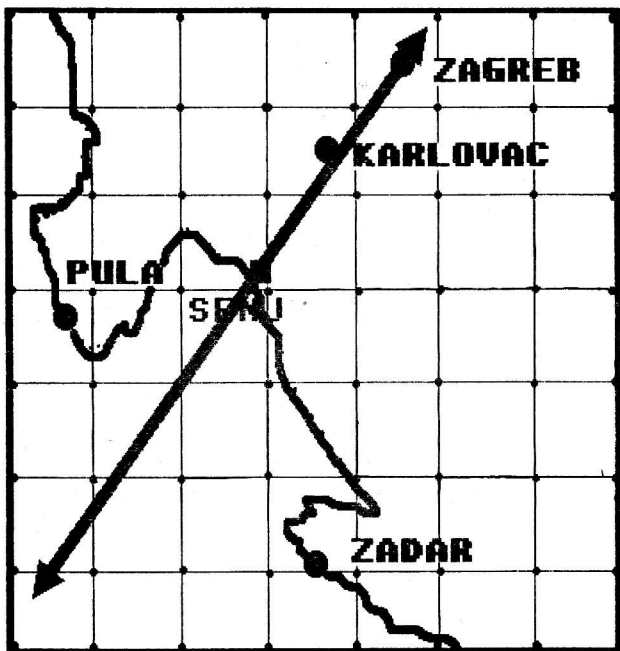
Poremećaji koji se u takvom fluidu javljaju valnog su porijekla, a turbulencija je posljedica rasipanja energije koja se javlja kad amplituda poremećenog valnog gibanja postane tako velika da se "lomi" i degenerira u nepravilno vrtložno gibanje koje se tada manifestira kao turbulencija. Intenzitet tako nastale turbulencije jako zavisi od energije koja se rasipa u tim prostorima.

Mi ćemo pretpostaviti da se intenzitet može vidjeti na vrijednostima određenih dinamičkih veličina koje su izvedene uspoređivanjem opserviranog intenziteta turbulencije i iznosa tih parametara. Rasipanje energije je sporadično, neravnomjerno raspoređeno u slojevima gdje se turbulencija javlja pa je zbog toga i uobičajeno ovu vrstu turbulenciju nazivati "patches of turbulence".

Pretpostavka od koje se ovdje polazi jest, da se energija koja se rasipa u turbulenciji bure mora reflektirati na iznosima provjerenih prediktora CAT-a. U skladu s našom pretpostavkom očekuje se povećanje vrijednosti polja određenih prediktora CAT-a u zonama gdje je izmjerena turbulencija bure. Osnovni problem je da se vidi da li se manifestacija turbulencije bure reflektira na nekim, i kojim do sada poznatim prediktorima CAT-a. Sasvim dobre potvrde u prilog ovakvim razmišljanjima dobivene su u radovima Stanković, 1988a, 1988b. Intenzitet turbulencije predstavlja pored lokacije vrlo značajnu informaciju, naročito s praktičnog aspekta. Ovdje se pokušao odrediti intenzitet turbulencije pri buri koja se dogodila 07.03.1982. godine. U prijepodnevnim satima avionskim letovima je ustanovljena umjerena do jaka turbulencija u vedrom zraku u slojevima od tla do oko 4 km visine uz obalu kod Senja. Toga dana vršena su sondažna mjerenja svaka tri sata na stanicama Zadar, Pula, Karlovac i Zagreb, što je pružilo relativno dobru gustoću podataka, i prostornu i vremensku, za analizu

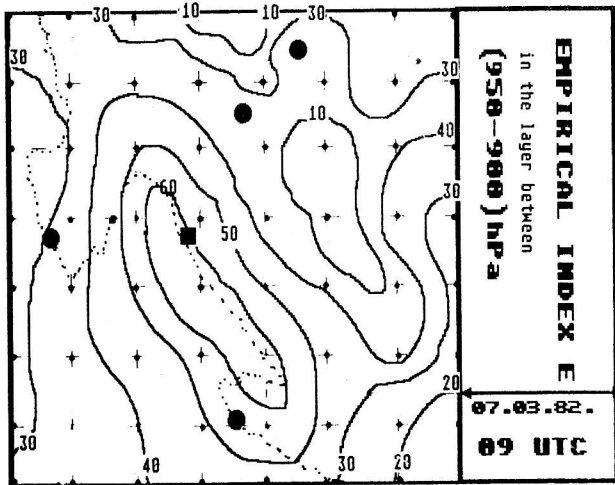
fenomena kao što je turbulencija u buri. Iskorištena je rijetka prilika da se istovremeno usporede i rezultati dobiveni avionskim mjerenjima i sondažni podaci da bi se došlo do određenih spoznaja o ovom fenomenu.

Kako bi se odredio intenzitet turbulencije bure, računata su polja empiričkog indeksa E koji predstavlja kombinaciju vertikalnog i horizontalnog smicanja vjetra kombiniranu u jednadžbi regresije. Podaci su provjereni na informacijama o turbulenciji dobivenim od 4500 avionskih letova iznad Sjevernog Atlantika i Sjeverozapadne Evrope.



Sl. 1. Mreža točaka u kojoj su računata polja prediktora E. Strelica pokazuje vertikalni presjek duž kojega su uzimane vrijednosti polja E za sve slojeve.

Fig. 1. The grid points in which E fields are calculated. The arrow shows the vertical cross section along which the values of E fields were taken for all layers.



Sl. 2. Polje indeksa E u mreži točaka za sloj 950-900 hPa. Fig. 2. Field of the E index in grid points for the 950-900 hPa layer.

2. ANALIZA POLJA EMPIRIČKOG INDEKSA

Prekidtor turbulencije vedrog zraka E:

$$E = 1,25 \times Sh + 0,25 \times (Sv)^2 + 10,5 \tag{1}$$

gdje je:

$$Sh = (1/V^2)(uv \partial u / \partial x - u^2 \partial u / \partial y + v^2 \partial v / \partial x - uv \partial v / \partial y) \tag{2}$$

horizontalno smicanje vjetra, $V = (u^2 + v^2)^{1/2}$ je horizontalni vjetar, u i v su komponente horizontalnog vjetra u x i y smjeru i Sv vertikalno smicanje vjetra:

$$Sv = \partial v / \partial p (\partial p / \partial z) \tag{3}$$

dobiven je multiplom linearnom regresijom kao "najbolji" prediktor CAT-a iz matrice korelacionih koeficijenata od jedanaest različitih prediktora (Dutton, 1980). Među testiranim prediktorima u ovoj matrici bili su; Richardsonov broj, Dijagnostička tendencija Richardsonovog broja (komponenta \emptyset_1 koja predstavlja tendenciju stabiliteta i komponenta \emptyset_2 koja predstavlja tendenciju smicanja), Dixonov index, vertikalno smicanje vjetra, horizontalno smicanje vjetra, vertikalna brzina vjetra, horizontalna brzina vjetra, divergencija, deformacija i vrložnost horizontalnog vjetra.

Ulazna polja (u,v,T) za računanje polja E kreirana su u mreži točaka 8 x 8 s razmakom točaka po horizontali 35 x 35 km (Sl. 1) iznad zapadnog dijela Jugoslavije iz radio-sondažnih podataka Zagreba, Karlovca, Pule i Zadra u 09 i 12 UTC 07.03.1982. ipo vertikali za svakih 50 hPa od 1000 do 600 hPa.

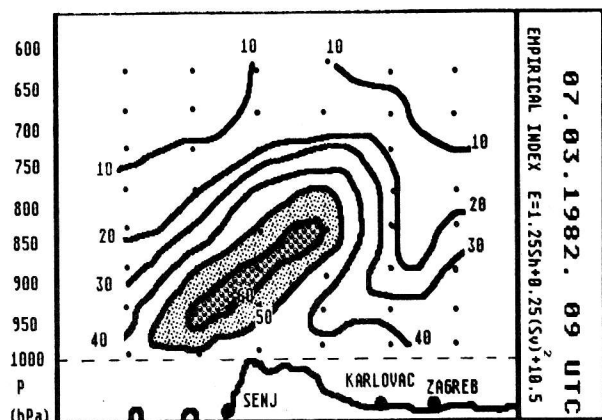
Iz polja ovih veličina u svakoj točki mreže za sve slojeve debljine 50 hPa od 1000 do 600 hPa računata su vrijednosti za empirički indeks E. Jedinice za horizontalno smicanje vjetra su $10^{-5} s^{-1}$ a za vertikalno smicanje vjetra $10^{-3} s^{-1}$. Iznosu za Sh i Sv u ovim jedinicama pomnoženim s odgovarajućim koeficijentima 1,25 i 0,25 dodavana je vrijednost 10,5 i tako su dobivene vrijednosti za E u svim točkama mreže za sve slojeve u oba termina. Na primjer u nekoj točki mreže (5x6) imamo vrijednosti za Sh = $5 \times 10^{-5} s^{-1}$ i vrijednost za Sv = $15 \times 10^{-3} s^{-1}$. Vrijednost za E dobijemo tako da uvrstimo iznose za Sh i Sv u formulu (1) iz koje dobijemo:

$$E = 1,25(5 \times 10^{-5} s^{-1}) + 0,25(15 \times 10^{-3} s^{-1})^2 + 10,5 = 6,25 \times 10^{-5} s^{-1} + 5,5 \times 10^{-5} s^{-2} + 10,5 = 6,25 + 5,5 + 10,5 = 22,25$$

Prilikom sabiranja ne uzimaju se u obzir jedinice jer nisu jednake za sve članove u jednadžbi.

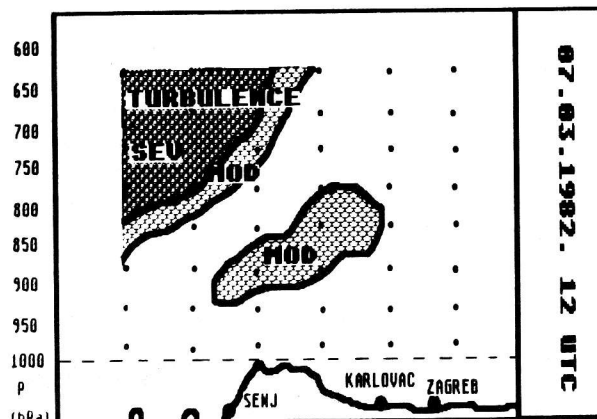
Primjer polja E u mreži točaka za sloj 950-900 hPa prikazan je na slici 2. Za tako dobivene vrijednosti napravljen je vertikalni presjek kroz sve slojeve od 1000 do 600 hPa duž linije sa strelicama prikazanim na slikama 1 i 2. Ovaj presjek se približno podudara s presjekom u kojem su vršene avionske opservacije turbulencije toga dana.

Polja E tako dobivena u vertikalnom presjeku za termin



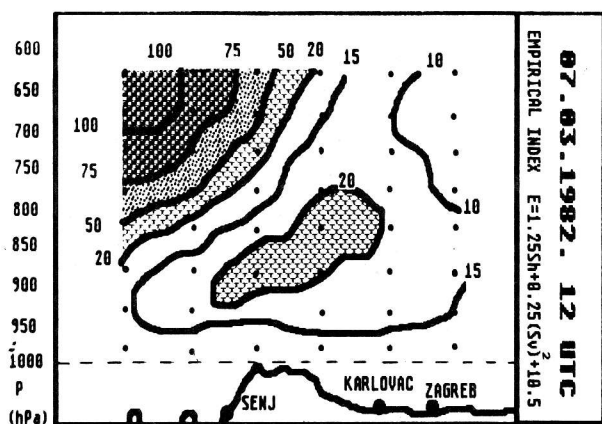
Sl. 3. Polje indeksa E u vertikalnom presjeku za termin 09 UTC.

Fig. 3. Field of the E index in the vertical cross section at 09 UTC.



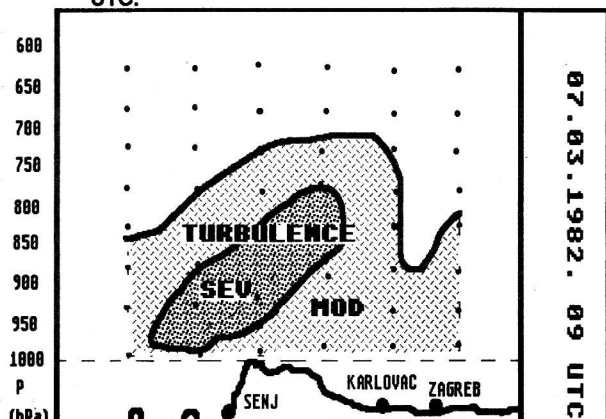
Sl. 6. Određivanje lokacije intenziteta turbulencije na osnovi vrijednosti polja indeksa E za termin 12 UTC. SEV znači jak i MOD umjeren intenzitet turbulencije.

Fig. 6. The determination of bora turbulence location and intensity on the basis of E fields at 12 UTC. SEV means severe intensity and MOD means moderate intensity.



Sl. 4. Polje indeksa E u vertikalnom presjeku za termin 12 UTC.

Fig. 4. Field of the E index in the vertical cross section at 12 UTC.



Sl. 5. Određivanje lokacije i intenziteta turbulencije na osnovi vrijednosti polja indeksa E za termin 09 UTC.

Fig. 5. The determination of bora turbulence location and intensity on the basis of E fields at 09 UTC.

09 UTC prikazana su na Sl. 3 a za termin 12 UTC na Sl. 4.

Iz distribucije polja E u ovim presjecima moguće je uočiti koncentraciju visokih vrijednosti za $E \geq 60$ u vrlo uskom području u nižim slojevima između ≈ 1000 i 850 hPa uz obalu kod Senja i vrijednosti za $E \geq 50$ u nešto većem području.

Udaljavajući se od obale idući u veće visine vrijednosti polja E znatno opadaju. Granična vrijednost za turbulenciju umjerenog intenziteta $E \geq 20$ locirana je u visinama između 850 i 750 hPa. Iznad ove visine vrijednosti za E su manje od 20 što prema istraživanjima Duttona (1980) indicira da u tim slojevima nema turbulencije.

Lokacija turbulencije i dijagnoza intenziteta izvedena iz distribucije indeksa E prikazana je na Sl. 5 za termin 09 UTC i na Sl. 6 za termin 12 UTC.

Empirički indeks je locirao turbulenciju jakog intenziteta u relativno malom području vertikalnog presjeka uz obalu kod Senja dok je prema ovom indeksu umjereni intenzitet turbulencije postojao u širem području i iznad kopna.

Grubost mreže nije dozvolila suptilniju analizu ovih prediktora što je rezultiralo prema našem mišljenju jednim širim turbulentnim područjem nego što je ono vjerovatno u stvarnosti bilo. Bez obzira na manjkavosti kojima najviše pridonosi mala gustoća mjerenja i nedostatak sondaže u Senju ili na otocima pored Senja, ipak rezultati pokazuju mogućnost lociranja turbulentnih zona i identificiranja njihovog intenziteta objektivnom metodom. Interesantno je uočiti da se je turbulentna zona već nakon tri sata u slijedećem terminu 12 UTC preselila u više slojeve i intenzificirala jer su vrijednosti polja E premašile maksimalni iznos u 09 UTC od 60 i povećale se na vrijednost čak 100 . Zona maksimalnog i još snažnijeg intenziteta preselila se u više slojeve između (800 - 600) hPa iznad mora i uz obalu kod Senja.

Umjeren intenzitet turbulencije s vrijednostima $E=20$ zadržao se u narednom terminu na približno istoj lokaciji na kojoj je u prethodnom bila jaka turbulencija.

3. ZAKLJUČCI

Polazeći od pretpostavke da je fizikalni mehanizam koji generira turbulenciju bure identičan mehanizmu nastanka CAT-a, bilo je interesantno vidjeti da li će prediktor CAT-a E imati sposobnost da locira turbulenciju u buri i indicira njezin intenzitet kako je to pokazano za CAT.

U granicama vremenske i prostorne rezolucije ulaznih podataka, na slučaju bure 07.03.1982. godine iz ALPEX-SOP, pokazano je da je turbulenciju bure moguće locirati i odrediti njezin intenzitet pomoću polja empiričkog indeksa E koji je ustanovljen kao "najbolji" prediktor CAT-a.

U analiziranom slučaju turbulencije bure mjerenja su pokazala da se sva turbulencija dogodila u vedrom, statički stabilnom zraku u kojem je postojalo jako vertikalno smicanje vjetrova Smith (1987).

Kako su to sasvim identični fizikalni uvjeti u kojima se pojavljuje turbulencija vedrog zraka, logično je očekivati da polje indeksa E može odraziti intenzitet turbulencije u buri i na taj način omogućiti dijagnozu njezinog intenziteta. Energija koja vrši rad u turbulenciji treba se osjetiti na poljima indeksa u tom smislu da povećano rasipanje energije indeks E osjeti i reagira s povećanjem vrijednosti iznad kritičnog iznosa. U analiziranom slučaju ponašanje indeksa E je bilo u skladu s očekivanjem, što na izvjestan način potvrđuje ispravnost postavljene teze da je turbulenciju bure moguće locirati CAT prediktorima.

U vertikalnom presjeku koji se podudara s presjekom u kojem su vršena avionska mjerenja turbulencije toga dana distribucija indeksa E je pokazala da je u području obale kod Senja u prizemnim slojevima egzistirala turbulencija bure jakog i umjerenog intenziteta. Avionskim mjerenjima je ustanovljeno da se umjereni i jaka turbulencija bure dogodila u vedrom, stabilno stratificiranom smicajućem zraku.

Rezultati u ovom istraživanju doprinose u prvom redu opravdanosti primjene ove metode za određivanje lokacije turbulencije bure i u drugom redu indiciraju da se istraživanja turbulencije bure u budućnosti trebaju istraživati ovim i sličnim metodama koje su primarno korištene samo za istraživanje turbulencije visokih slojeva.

Osim toga poznato je da se turbulencija u prizemnim slojevima atmosfere često javlja kao posljedica nestabilnosti niske mlazne struje, što je u osnovi analogno s nestabilnosti i turbulencijom u visinskoj mlaznoj struji koja je u literaturi nazvana CAT.

Rezultati u ovom radu pokazali su veliku varijabilnost prostornog i vremenskog pojavljivanja turbulencije bure. U vremenskom intervalu od tri sata turbulencija je promijenila i mjesto pojavljivanja i intenzitet, što se reflektiralo na promjeni polja E u vertikalnom presjeku.

Sasvim preciznu i suptilniju analizu turbulencije u buri ovom metodom moguće je provoditi ako se raspoloživo finijom vremenskom i prostornom rezolucijom ulaznih polja.

Rezultati ovdje dobiveni za termin 09 i 12 UTC 07.03.1982. godine pokazali su da se u području gdje je avionski ustanovljena turbulencija pojavljuje veliki porast vrijednosti ovog indeksa. Također i intenzitet kojeg je prezentirao Smith pokazuje grubu koincidenciju s povećanim iznosima E.

Prilikom ovih ocjena podudarnosti izmjerenih turbulentnih područja i onih koja su dobivena numeričkim računanjem

ovog parametra treba svakako imati u vidu činjenicu da je određivanje intenziteta i lokacije turbulencije ipak velika aproksimacija jer je razmak točaka mreže od 35 km prevelik za preciznije određivanje.

Međutim, uprkos svim ovim nedostacima, dobiveni rezultati daju nadu da se u praksi turbulencija bure i intenzitet mogu objektivno procjenjivati iz vrijednosti polja empiričkog indeksa E ako se raspoloživo ulaznim podacima prostorne i vremenske rezolucije koja je korištena u ovom istraživanju.

4. LITETATURA

- ATLAS, D., J.I. METCALF, J.H. RICHTER and E.E. GOSSARD, 1970: The birth "CAT" and microscale turbulence. *J. Atmos. Sci.*, 27, 903-913.
- DAVIS, P.A., and W.R. PELTIER, 1977. Effects of dissipation on parallel shear instability near the ground. *J. Atmos. Sci.*, 34, 1868-1884.
- DUTTON, M.J., 1980: Probability forecasts of clear air turbulence based on numerical model output. *Met. Mag.*, 109, 293-307.
- EINAUDI, F., D.P. LALAS and G.E. PERONA, 1978/1979: The role of gravity waves in tropospheric processes, *Pure Appl. Geophys.*, 117, 627-663.
- MERRILL, J.T., 1977: Observational and theoretical study of shear instability in the airflow near the ground. *J. Atmos. Sci.*, 34, 911-921.
- KLASSEN, G.P., and W.R. PELTIER, 1985: Evolution of finite amplitude Kelvin - Helmholtz billows in two spatial dimensions. *J. Atmos. Sci.*, 42, 1321 - 1339.
- KLEMP, J.B., and D.K. LILLY, 1975: The dynamics of wave-induced downslope winds. *J. Atmos. Sci.*, 32, 320-339.
- LESTER, P.F., and W.A. FINGERHUT, 1974: Lower turbulent zones associated with mountain lee waves. *J. Appl. Met.* 13, 54-61.
- SMITH, R.B., 1977: The steepening of hydrostatic mountain waves. *J. Atmos. Sci.*, 34, 1634-1654.
- SMITH, R.B., 1985: On severe downslope winds. *J. Atmos. Sci.*, 42, 2597-2603.
- SMITH, R.B., 1987: Aerial observations of the Yugoslavian bora. *J. Atmos. Sci.*, 44, 269-297.
- STANKOVIĆ, K., 1988a: O mogućnosti objektivnog lociranja turbulencije bure. *Rasprave RHMZ*, 23, 75-83.
- STANKOVIĆ, K., 1988b: 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

We started from the hypothesis that the physical mechanism generating bora turbulence is similar to the clear air turbulence generation mechanism. It was interesting in these terms to explain the possibility for determining location and intensity of bora turbulence by empirical index E which is found as "the best" clear air turbulence predictor. In the analysed case of bora turbulence the measurements indicated that all observed turbulence occurred in clear, stable stratified shearing flow (Smith, 1987).

These conditions are concluded to be identical with conditions in which clear air turbulence appears. For this reason it is logical to expect that the fields of empirical index E may reflect bora turbulence conditions, like CAT: and react in such a way as to increase the value of

E in layers with increased turbulence intensity. The behavior of index E was in agreement with expectations.

In a vertical cross section which coincides with the cross section in which measurements of bora turbulence are made by aircraft, one finds the regions in which index E exceeds the critical value for moderate or severe turbulence intensity. The obtained results are in agreement with the observed bora turbulence intensity and they suggest that bora turbulence can be explained by such or a similar method, used up to now only in explaining clear air turbulence. Input fields (u, v, T) for computing index E use the 8x8 grid point network covering a part of western Yugoslavia with a horizontal resolution 35 km and a vertical resolution 50 hPa.

The results show a large space and time variability of E. In a time interval of three hours, turbulence changes its location and intensity, which is reflected in changes of E field in vertical cross sections.

It would be possible to make a very precise and subtle analysis of bora turbulence by means of this method should we have a finer resolution of input fields, perhaps by a numerical procedure.

The key conclusion of this paper emphasizes the possibility of determining bora turbulence location and intensity by means of empirical index, E otherwise used as a clear air turbulence indicator.