

Profil vjetra u prizemnom sloju atmosfere

Wind Profile in Surface Layer of the Atmosphere

Lidija Cvitan

Republički hidrometeorološki zavod, Zagreb, Hrvatska

Primljeno 26.08. 1991, u konačnom obliku 05.09. 1991

Sažetak

U radu je opisan način primjene Monin-Obukhove teorije sličnosti u simuliranju profila vjetra za operativne potrebe na ravničarskom terenu sjeverozapadne Hrvatske. Ulazni podaci modela su temperatura zraka sa dva nivoa, brzina vjetra s jednog nivoa i duljina hrapavosti z_0 - konstanta koja se pridjeljuje na temelju klasifikacije terena prema visini njegovih prepreka. Pojedini parametri definirani teorijom sličnosti radi što veće točnosti određeni su iterativnom metodom. Kako je uočena velika ovisnost profila vjetra na promatranoj lokaciji o stabilnosti atmosfere, provedena je specifična stabilnosna klasifikacija na bazi vrijednosti bulk Richardsonovog broja. Za svaku klasu stabilnosti izvedene su, na principu univerzalnih funkcija iz teorije sličnosti pripadne lokalne funkcije. Tek uključivanjem tih funkcija u model postignuta je zadovoljavajuća simulacija realnih profila vjetra.

Ključne riječi: Monin-Obukhova teorija, univerzalne funkcije, iterativna metoda, stabilnosna stratifikacija

Abstract

A wind model based on the Monin-Obukhov theory has been prepared for operational use over flat terrain in northern Croatia. The input parameters are air temperature at 2 and 35 m, wind speed at 35 m and a constant value for surface roughness length z_0 determined on the basis of terrain classification by Kondo and Yamazawa (1986). The iterative method was used to improve the accuracy of some similarity parameters. The wind profiles showed considerable dependence upon stability. Therefore special stability categories were introduced, based on the values of bulk Richardson number. Based on the similarity theory universal functions, the local functions were derived for each stability class. These functions were included into the model and only then a satisfactory wind speed profile simulation was achieved.

Key words: Monin-Obukhov theory, universal functions, iterative method, stability classification

1. Uvod

Granični sloj atmosfere doseže maksimalno 1000 do 2000 m nad tlom i pod ve-

likim je utjecajem tla. Zato je njegove fizikalne zakone teško definirati. Poznavanje tih zakona, kao npr. promjene vjetra visinom, vrlo je značajno za život čovjeka i za pla-

niranje njegove djelatnosti.

Promjene brzine vjetra visinom u najnižim slojevima atmosfere, često se za praktične potrebe opisuju zakonom potencija. No, takve zakonitosti nemaju fizikalnu podlogu, te je njihova upotreba ograničena i primjenjuju se uz strogo definiranje uvjeta na koje se odnose (Touma, 1977; Sedefian, 1980; Hsu 1982; Joffre, 1984, Cvitan, 1991).

Monin-Obukhova teorija sličnosti opisuje profil vjetra u tzv. prizemnom sloju atmosfere uzimajući u obzir fizikalne karakteristike toga sloja (Tennekes and Lumley, 1972; Businger, 1973). Prizemni sloj je najniži dio graničnog sloja i čini samo njegovih 10 %. Teorija sličnosti je temeljena na parametrizaciji površinskih turbulentnih tokova, a koristi univerzalne funkcije sličnosti čije koeficijente za svaku pojedinu lokaciju treba posebno eksperimentalno odrediti na bazi specijalnih mjerenja. Eksperimenti koji se provode u cilju utvrđivanja lokalnih turbulentnih tokova u površinskom sloju zahtijevaju skupi instrumentarij, koji često nije dostupan. Otuda potječe potreba da se razviju metode koje bi isti cilj ostvarile korištenjem mjerenja jednostavnijim instrumentima eventualno postavljenim na više nivoa (Hanna and Panofsky, 1969; Korell et al., 1982).

Sada već postoje i teorije (Yamada, 1976) kojima je razrađena parametrizacija cijelog graničnog sloja (površinskog sloja i Ekmanovog sloja). Dakle postoje relacije kojima se povezuju turbulentni tokovi unutar graničnog sloja sa tzv vanjskim parametrima - parametrima izvan njega. Međutim, pouzdane informacije o vanjskim parametrima iznad promatranih lokacija (mjerene ili proračunate vrijednosti) najčešće nisu dostupne. Osim toga, spomenute relacije još uvijek nisu dovoljno precizne i daju velika odstupanja u odnosu na realna stanja. To se pogotovo uočava u slučaju njihove primjene na simulaciju pojedinačnih (trenutnih) profila, dok su pri prognozi "srednjih" stanja u numeričkom modeliranju mnogo pogodnije.

U ovom radu je prikazana simulacija pojedinačnih profila vjetra do 150 m visine nad ravnim terenom. Ta je visina proizvoljno odabrana kao pretpostavljena maksimalna visina prizemnog sloja. Zbog upravo spome-

L. Cvitan: Profil vjetra u prizemnom sloju atmosfere

nutih razloga simulacija je provedena primjenom Monin-Obukhove teorije. U promatranom slučaju također je nedostajao specijalni instrumentarij. Opisani su postupci kojima se taj nedostatak nastojao eliminirati, a to su uvođenje intenzivnijih mjerenja korištenjem klasičnih instrumenata i primjena iterativne metode (Koračin i Mastnak-Car, 1983) pri određivanju pojedinih univerzalnih parametara. Zbog toga se predviđa mogućnost operativnog korištenja ovakve simulacije koja je zbog operativnih potreba na danj lokaciji i istraživana.

2. Teorija

Cijeli granični sloj atmosfere, pa tako i njegov najniži dio, površinski sloj, kontinuirano je turbulentan. Turbulentni vrtlozi obavljaju trodimenzionalni prijenos (razmjenu) svih svojstava tog dijela atmosfere (npr. količine gibanja, temperature i vlage). Najvažnija je vertikalna komponenta turbulentnog prijenosa, tj. prijenos vertikalnom komponentom turbulentne brzine w' . Prema Monin-Obukhovoju teoriji, pomoću srednjih vrijednosti turbulentnih tokova količine gibanja i temperature zraka ($\overline{w'u'}$ i $\overline{w'\theta'}$) definirana je karakteristična dimenzija duljine L koja se koristi i pri definiranju profila vjetra. To je tzv. Monin-Obukhova duljina:

$$L = - \frac{\overline{\theta} u_*^3}{k g \overline{w'\theta'}} \quad (1)$$

gdje je $k = 0.35$ - von Karmanova konstanta, $g = 9,81 \text{ ms}^{-2}$ - akceleracija sile teže, $\overline{\theta}$ - srednja temperatura u promatranom sloju zraka, u_* - brzina trenja (potezanja):

$$u_*^2 = - \overline{w'u'} = \tau/\rho \quad (2)$$

pri čemu je τ horizontalna napetost potezanja, tj. sila koja izražava utjecaj turbulentne komponente brzine na ukupni razvoj srednjeg profila vjetra.

Turbulentni tok temperature $\overline{w'\theta'}$ ima pri nestabilnoj stratifikaciji pozitivan smjer, tj. od tla, a pri stabilnoj stratifikaciji negativan smjer, tj. prema tlu. Prema tome,

Monin-Obukhov parametar L je stabilnosni parametar. Njegov negativan predznak karakterizira nestabilno stratificiranu atmosferu, a pozitivan stabilno stratificiranu. U neutralnoj atmosferi kada je tok temperature $\overline{w'\theta'} \approx 0$, $L \rightarrow \infty$.

U teoriji sličnosti se koriste bezdimenzionalni profili vjetra i temperature kao funkcije također bezdimenzionalne visine. Bezdimezioniranje visine z se provodi pomoću spomenute veličine L određene za pripadnu stabilnosnu stratifikaciju atmosfere. Tako je definiran još jedan stabilnosni parametar (z/L) čiji predznak ima, naravno, isto značenje kao i predznak parametra L . Pri definiranju pojedinih profila primjenjuju se tzv. univerzalne funkcije Φ (Hogstrom, 1988):

$$\frac{kz}{u_*} \left(\frac{\partial U}{\partial z} \right) = \Phi_m(z/L) \quad (3)$$

$$\frac{kz}{u_*} \left(\frac{\partial \Theta}{\partial z} \right) = \Phi_h(z/L) \quad (4)$$

U je srednja vrijednost brzine vjetra na visini z . Pretpostavlja se da je smjer vjetra visinom konstantan u plitkom prizemnom sloju atmosfere, a koordinatni sustav se orijentira tako da je X os u tom smjeru. Θ je potencijalna temperatura na visini z , a Φ_m i Φ_h su univerzalne funkcije, koje ovise o parametru stabilnosti atmosfere z/L . Analički oblik univerzalnih funkcija određen je eksperimentalnim načinom. Do sada je objavljivano nekoliko njihovih oblika, npr.:

Businger i suradnici (1971):

$$\Phi_m = \begin{cases} (1 - 15 z/L)^{-1/4} & z/L < 0 \\ 1 + 4.7 z/L & z/L \geq 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$\Phi_h = \begin{cases} 0.74 (1 - 9 z/L)^{-1/2} & z/L < 0 \\ 0.74 + 4.7 z/L & z/L \geq 0 \end{cases} \quad (6)$$

Wieringa (1979):

$$\Phi_m = \begin{cases} (1 - 22 z/L)^{-1/4} & z/L < 0 \\ 1 + 6.9 z/L & z/L \geq 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$\Phi_h = \begin{cases} (1 - 13 z/L)^{-1/2} & z/L < 0 \\ 1 + 9.2 z/L & z/L \geq 0 \end{cases} \quad (8)$$

Integriranjem izraza (3) i (4) od visine hrapavosti tla z_0 do nivoa z dobiva se vertikalni profil brzine vjetra i temperature:

$$u(z) = u_* / k [\ln(z/z_0) - F_m(z/L) + F_m(z_0/L)] \quad (9)$$

$$\Delta\Theta(z) = R\Theta_* / k [\ln(z/z_0) - F_h(z/L) + F_h(z_0/L)] \quad (10)$$

$R = 0.74$ je konstanta, F_m i F_h su izrazi dobiveni integriranjem funkcija Φ_m i Φ_h (Paulson, 1970):

$$F_m = \ln \left[\frac{(1+X)^2/4}{(1+X^2)/2} \right] \quad z/L < 0 \quad (11)$$

$$X = (1 - 15 z/L)^{1/4}$$

$$F_h = 2 \ln \left[\frac{(1+Y)/2}{Y} \right] \quad (12)$$

$$Y = (1 - 9 z/L)^{1/2}$$

$$F_m = -4.7 z/L \quad z/L \geq 0 \quad (13)$$

$$F_h = -4.7 z/LR \quad (14)$$

(gornja integracija koristi oblike (5) i (6) funkcija Φ_m i Φ_h).

3. Ulazni podaci

Lokacija izvođenja dvaju eksperimenata nalazila se na ravničarskom terenu sjeverozapadne Hrvatske, u neposrednoj blizini pogona za eksploataciju zemnog plina. Periodi u kojima su ti eksperimenti provedeni su 13-17. 3. 1983. i 16-19. 10. 1984.

Eksperiment je uključivao visinska mjerenja meteoroloških veličina u satnim terminima vezanom sondom i pilot balonima, pri čemu je u pojedinom satnom terminu obavljana samo jedna vrsta visinskog mjerenja. Prizemno su na meteorološkom stupu u satnim terminima mjereni temperatura zraka i vjetar na tri nivoa- 2, 10 i 35 m.

U ovom radu će biti opisani rezultati modela vjetra u prizemnom sloju, koji je kao ulazne podatke koristio temperaturu mjerenu na 2 i 35 m te podatke vjetra na 35 m. Duljina hrapavosti promatranog terena z_0 određena je na temelju visina prepreka u okolini mjernog mjesta prema klasifikaciji Kondo i Yamazawa, 1986. Za oba perioda mjerenja korištena je ista duljina hrapavosti.

Naime, iako su dva perioda mjerenja bila u različitim godišnjim dobima, samo godišnje doba bilo je pri tome manje važan faktor, jer u najbližem prostoru nije bilo takvog raslinja čija visina se značajno mijenja kroz godinu. Međutim, veliku važnost u oba perioda imala je blizina prepreka od industrijskog postrojenja. Korištena vrijednost z_0 u proračunima iznosila je 0.1 m.

4. Ocjena stabilnosti atmosfere

Prilikom primjene univerzalnih funkcija za pojedine stabilnosti radi simuliranja profila brzine vjetra, utvrđeno je da kriterij stabilnosti određen samo na temelju predznaka parametra z/L nije dovoljan. Naime, pri određivanju spomenutog kriterija bilo bi realnije, uz uvažavanje predznaka, uzeti u obzir i apsolutnu vrijednost tog parametra, te primijeniti univerzalne funkcije koje bi bile izvedene za pojedine intervale vrijednosti tog parametra z/L . Međutim, Monin-Obukhova duljina L u primijenjenom modelu određuje se iterativnom metodom za koju je prethodno potrebno u proračun uvrstiti odgovarajući oblik univerzalne funkcije. Kako u tom slučaju unaprijed ne znamo kojem intervalu vrijednosti z/L (stabilnosnoj kategoriji) tražena univerzalna funkcija pripada, spomenuta kategorizacija stabilnosti nije se ovdje mogla primijeniti.

Zbog upravo navedenog razloga, kao i zbog vrste ulaznih meteoroloških podataka kojima se raspolagalo, prva procjena stabilnosti atmosfere provedena je na temelju tzv. bulk Richardsonovog broja R_B :

$$R_B = \frac{g \Delta\Theta/\Delta z_{\Theta}}{\bar{\Theta} U^2/z_u^2} \quad (14)$$

gdje je $g = 9.81 \text{ ms}^{-2}$; $\bar{\Theta}$ - srednja (potencijalna) temperatura i $\Delta\Theta/\Delta z$ - gradijent temperature izražen preko konačnih razlika u promatranom slučaju su određeni na temelju temperatura na 2 i 35 m nad tlom; U - referentna brzina vjetra na visini (z_u) od 35 m nad tlom.

R_B je pojednostavljeni oblik Richardsonovog broja Ri :

$$Ri = \frac{g \partial\Theta/\partial z}{\Theta (\partial U/\partial z)^2}$$

Budući da na temelju mjerenih veličina taj parametar Ri nije moguće dovoljno točno odrediti, za praktične potrebe se mnogo češće koristi bulk Richardsonov broj R_B (Hanna and Panofsky, 1969).

Pri nestabilnoj stratifikaciji Richardsonov broj je negativan, pri neutralnoj je nula, a pri statički stabilnoj Ri ima pozitivne vrijednosti, što se poklapa s predznakom veličine L .

Stabilnosni kriteriji definirani su s obzirom na dvije granične vrijednosti Richardsonovog broja. To su kritični R_C i "turbulentni" Richardsonov broj R_T . Kao njihove vrijednosti najčešće se koriste $R_C = 0.21$ ili $R_C = 0.25$ i $R_T = 1.0$ iako o njima postoje podijeljena mišljenja raznih autora (Stull, 1988). Prema definiciji, laminaran tok postaje turbulentan kad se vrijednost Ri broja smanji, tako da je: $Ri < R_C$, a turbulentan tok postaje laminaran kad postane: $Ri > R_T$. Razlog da se definiraju dvije spomenute referentne vrijednosti Richardsonovog broja ukazuje na specifičnosti prijelaza iz neturbulentnog u turbulentno stanje i obrnuto. Naime, da bi laminaran fluid postao turbulentan, njegov Ri broj mora biti manji od R_C . Međutim, kada se turbulencija razvije u fluidu, ona može opstati iako se u međuvremenu Richardsonov broj poveća iznad R_C , pa čak i nešto iznad R_T . Vrijednosti R_C i R_T u praksi se primjenjuju i kao granične vrijednosti R_B parametra.

5. Lokalne funkcije

$$\Phi_{m1}(z/L) \text{ i } \Phi_{m1}(z/L)$$

U Jugoslaviji do sada još nije primjenjivana teorija sličnosti pri određivanju profila vjetra za praktične potrebe. Zato se simulaciji profila vjetra pristupilo korištenjem publiciranih izraza izvedenih za nekoliko ravničarskih terena u svijetu. Kao što se vidi u drugom poglavlju, ti izrazi izvedeni su za tri osnovna tipa profila vjetra, odnosno, svaki od njih za po jednu od osnovnih stra-

tifikacija atmosfere - stabilnu, labilnu i neutralnu. Zato se prvi korak u nastojanju da se primijeni Monin-Obukhova teorija na profile vjetra nad našim područjem sastojao u klasifikaciji mjenjenih profila vjetra prema stabilnosti u tri osnovne klase.

Na promatranom lokaciji je utvrđeno da pri nestabilnoj i neutralnoj stratifikaciji teoretski profili vjetra temeljeni na Busin-gerovim oblicima univerzalnih funkcija dobro simuliraju realne profile.

Međutim, pri stabilnim stanjima nije dobiveno dobro podudaranje realnih profila vjetra niti sa jednim tipom teoretskih profila poznatih iz literature.

To je ukazalo na potrebu da se za tu lokaciju pri stabilnoj stratifikaciji, a na principu univerzalnih funkcija, izvedu lokalne funkcije za ovisnost bezdimenzionalnih gradijenata vjetra o bezdimenzionalnoj visini. Pri tome su, s obzirom na intenzitet stabilnosti u stabilno stratificiranoj atmosferi, određene tri vrste lokalnih funkcija. Naime, tek nakon grupiranja izmjerenih lokalnih profila vjetra unutar iste- stabilne kategorije prema specifičnom kriteriju, uspješno se odrediti analitičke krivulje koje su svakoj od "podvrsta" profila dobro prilagođene.

Kriterij za određivanje spomenute tri klase unutar stabilne stratifikacije temeljen je na vrijednostima R_B parametra. U literaturi se u okviru teorije sličnosti najčešće objavljuju rezultati proučavanja profila vjetra pri takvim stabilnostima u kojima pripadni R_B broj nije veći od 0.25. Naime, obično se strujanja uz veći R_B broj tretiraju kao laminarna, dakle kao ona za koja nema niti teoretskog opravdanja za proučavanje teorijom sličnosti. Međutim, postoje i teorije o mogućnosti održavanja turbulentnih gibanja i pri većim R_B brojevima (spomenuto u prethodnom poglavlju). Takve teorije smo željeli provjeriti, tim više što je u promatranom periodu na danoj lokaciji bilo mnogo slučajeva vrlo stabilne atmosfere čiji je proračunati R_B broj bio često u granicama $0.25 < R_B < 1.0$ ili čak $R_B > 1.0$. Dakle, specifičnost primjenjenog stabilnosnog kriterija sastojala se i u tome da su njime obuhvaćene i ekstremno stabilne klase stabilnosti.

Uspješnom simulacijom profila vjetra

u pojedinim dijelovima promatranog sloja atmosfere na temelju pripadnih izvedenih lokalnih funkcija u svim stabilnosnim klasama pokazano je da su i pri veoma stabilnim stanjima gibanja u atmosferi još uvijek imala turbulentan karakter.

Utvrđene lokalne funkcije na promatranom području kojima su najbolje simulirani prijenos količine gibanja i prijenos količine topline navedene su prema pojedinim stabilnosnim kategorijama atmosfere i imaju slijedeće oblike:

$$z/L < 0 \quad R_B < 0 \quad \Phi_{m1} = (1 - 15 z/L)^{-1/4} \quad (15) \\ \Phi_{h1} = 0.74(1 - 9 z/L)^{-1/2}$$

(za labilnu stratifikaciju

$$\Phi_{m1} = \Phi_m \text{ i } \Phi_{h1} = \Phi_h \text{ iz (5) i (6)})$$

$$z/L \geq 0 \quad 0 < R_B < 0.6 \quad \Phi_{m1} = 1 + z/L \quad (16) \\ \Phi_{h1} = 0.74 + z/L$$

$$0.6 < R_B < 1.1 \quad \Phi_{m1} = 1 + 0.5z/L \quad (17) \\ \Phi_{h1} = 0.74 + 0.5z/L$$

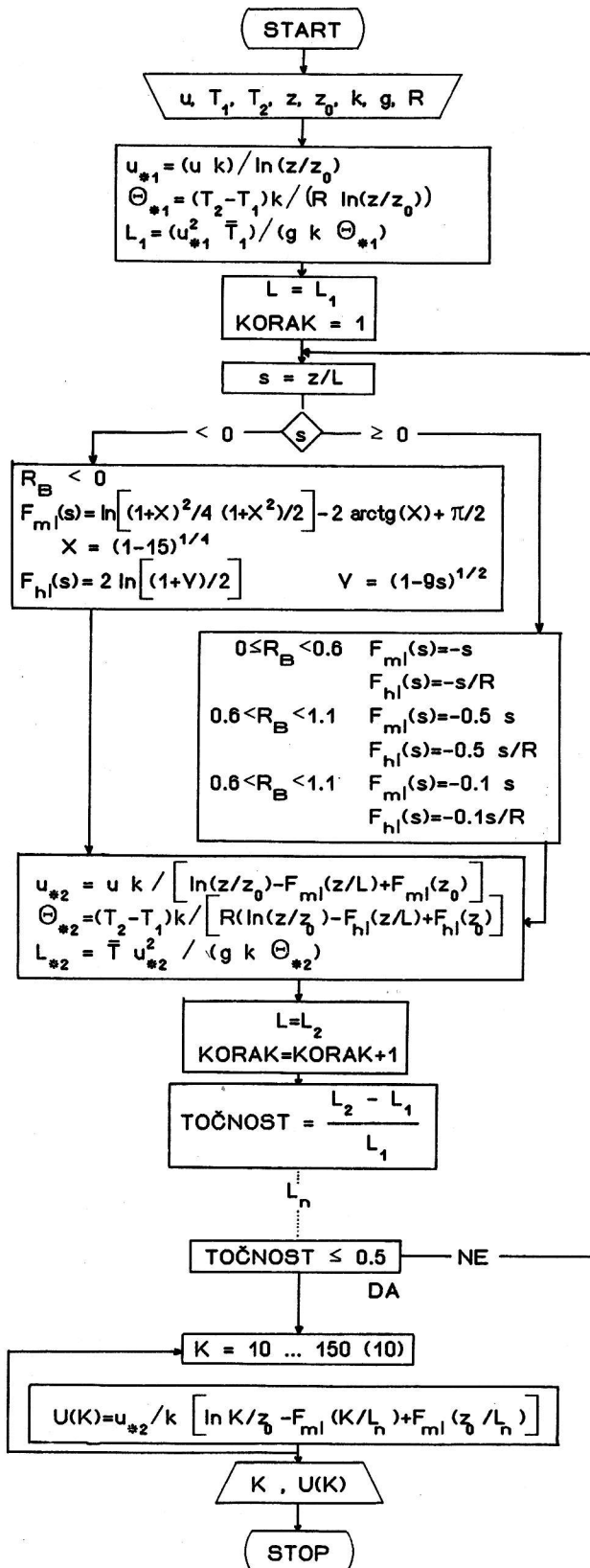
$$1.1 < R_B < 2.5 \quad \Phi_{m1} = 1 + 0.1z/L \quad (18) \\ \Phi_{h1} = 0.74 + 0.1z/L$$

Na nekoj drugoj lokaciji, možda i ne jako udaljenoj, vjerojatno bi se razlikovali kako stabilnosni kriteriji tako i oblici lokalnih funkcija. Međutim, pri njihovom određivanju moguće je primijeniti upravo opisanu metodu.

6. Iterativna metoda

Meteorološki podaci koji su bili raspoloživi na promatranom lokaciji ukazivali su na potrebu korištenja iterativne metode. Naime, budući da turbulentne veličine koje ulaze u proračun profila vjetra nisu mjerene direktno, već su se računale, trebalo ih je višestruko provjeriti. Kao način provjere odabrana je konvergencija njihovih izračunatih vrijednosti iz koraka u korak iterativnog postupka.

Postupak određivanja profila vjetra u prizemnom sloju prikazan je grafički dijagramom toka na sl. 1 izvedenim prema relacijama (9) i (10). Tim postupkom određen



Sl. 1. Dijagram toka primijenjenog modela vjetra u prizemnom sloju atmosfere.

Fig. 1. Graphic presentation of the surface layer wind model work (flow diagram)

je teoretski profil vjetra za svaki pojedini termin za koji se raspolagalo i realnim profilom vjetra izmjerenim vezanom sondom.

Kao što obrnuti trapez u dijagramu toka pokazuje, za proračun pojedinog profila vjetra potrebno je učitati podatke iz tog termina i to podatke o: temperaturama zraka na dva nivoa (T_1 i T_2), vjetru (U) na referentnom nivou (z), visini tog referentnog nivoa (z), te vrijednosti nekoliko konstanta (njihove vrijednosti dane su u prethodnom tekstu). Zatim se, najprije uz pretpostavku neutralno stratificirane atmosfere, određuju karakteristične dimenzije turbulentnog prijenosa količine gibanja u_* i turbulentnog prijenosa temperature Θ_* ($\Theta_* = -\overline{w'\theta'}/u_*$). Kad su te vrijednosti određene, računa se i prva vrijednost parametra L . Tek u drugom koraku iteracije uzima se u obzir stabilnost atmosfere. Tada se na temelju predznaka parametra L i vrijednosti parametra R_B određuju nove vrijednosti u_* i (lokalne funkcije se računaju na temelju L -a iz prethodnog koraka), pa pomoću njih i novi L . Vrijednosti parametra L iz prethodnog i momentalnog koraka se uspoređuju. Ako je razlika među njima manja od 5 % od same duljine L -a, iteracija se obustavlja, a ta zadnja vrijednost L -a koristi se za proračun profila vjetra.

Prihvaćeno je da greške koje nastaju pri računanju gradijenata pojedinih meteoroloških veličina zbog samog mjernog instrumentarija mogu biti u rasponu od 5-15 % (Arya, 1991). Točnost veličine L ovisi o točnosti spomenutih gradijenata. Iteracijom se nastojalo što preciznije odrediti vrijednost Monin-Obukhove duljine. Pri tome se vodilo računa da zahtjevana preciznost bude u okviru realnih mogućnosti, te je s obzirom na spomenutu maksimalnu očekivanu preciznost instrumentarija kao granica za duljinu iterativnog postupka korištena točnost 5%. Odabranu točnost koristili su u sličnim iterativnim metodama još neki autori (Holtslag, 1984).

7. Analiza profila vjetra

Analizom profila vjetra se nastojalo utvrditi koliko lokalne univerzalne funkcije doprinose poboljšanju simulacije profila vjetra

na promatranju lokaciji. Analiza je provedena po klasama stabilnosti atmosfere za koje su spomenute lokalne funkcije i utvrđene - po jedna nestabilna i neutralna klasa i tri klase stabilnih stanja. Dulji period mjerenja bi možda ukazao na postojanje značajnijih različitosti (klasa) u profilima vjetra i unutar nestabilnih i neutralnih tipova stabilnosti. Budući da sva radio-sondažna mjerenja nisu provedena do iste visine, analizirani su profili vjetra do 150 m nad tlom jer se do te visine raspolagalo najvećim brojem mjerenih profila.

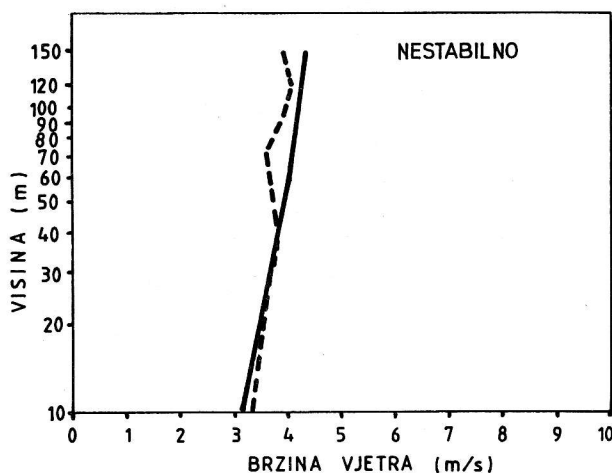
Kao mjere odstupanja proračunatih od mjerenih profila vjetra, određene su standardna devijacija i srednje apsolutno odstupanje σ/\sqrt{n} na pojedinim nivoima, a prikazane su u tab. 1. Tu je n broj slučajeva pri pojedinoj stabilnosnoj stratifikaciji atmosfere kada su mjerenja profila vjetra provedena vezanom sondom.

Broj slučajeva mjerenja vezanom sondom n bio je pri neutralnoj i pri ekstremno stabilnoj klasi stabilnosti vrlo mali. Zato je za te slučajeve kvalitativna provjera izvedenih lokalnih funkcija koja je provedena i indirektno, odnosno korištenjem pilot-balonskih mjerenja, imala veći značaj. Naime, na promatranju lokaciji su se (pri sličnim stabilnosnim stanjima, ali u drugim terminima nego mjerenja vezanom sondom) provodila i pilot-balonska mjerenja, koja su dođue bila primjenljivija za provjeru simulacije vjetra iznad prizemnog sloja. Zadatak vezan uz promatrani eksperiment sastojao se između ostaloga i u izradi modela vjetra za sloj atmosfere iznad prizemnog sloja temeljenog na rezultatima simulacije vjetra u prizemnom sloju. Stoga su za pojedine klase stabilnosti uspoređivani i profili vjetra iznad prizemnog sloja. Na taj način se posredno zaključilo i o valjanosti prizemnog modela. (Opis modela za sloj iznad prizemnoga i spomenute analize prelaze okvire ovog članka). Budući da su pri svim klasama stabilnosti modelirani profili vjetra i unutar prizemnog sloja kao i iznad njega relativno dobro simulirali izmjerene profile, na priloženim sl. 2 - 4 su predloženi srednji profili proračunati za sve klase, na definiranje kakvih su upućivale specifičnosti atmosferskih stanja izmjerene vezanom sondom.

Tab. 1. Srednji mjereni (\bar{U}_0) i modelirani (\bar{U}_m) profili vjetra po razinama i njihovo međusobno apsolutno odstupanje (σ/\sqrt{n} ; n je broj mjerenja vezanom sondom)

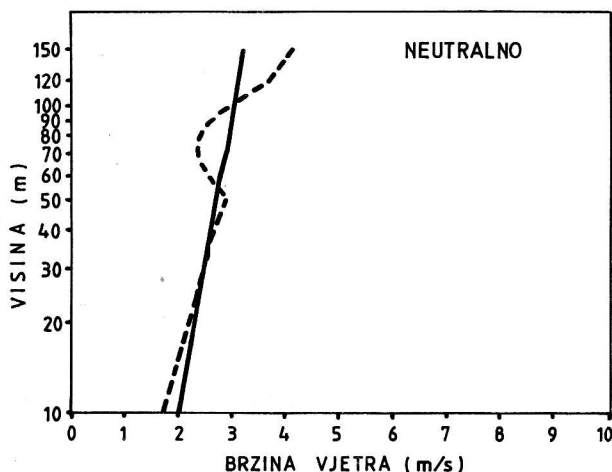
Tab. 1. Averages of observations (\bar{U}_0) and modelled profiles (\bar{U}_m) at 12 heights z(m) and their absolute differences (σ/\sqrt{n} ; n is the number of radiosonde measurements)

R_B	$R_B < 0$	$R_B = 0$	$0 < R_B < 0.6$	$0.6 < R_B < 1.1$	$1.1 < R_B < 2.5$	UKUPNO	
z(m)							
10	3.3	1.8	2.1	1.1	0.9	2.2	\bar{U}_0
	3.2	2.0	2.6	1.2	0.8	2.4	\bar{U}_m
	0.17	0.30	0.11	0.16	0.12	0.14	σ/\sqrt{n}
20	3.5	2.3	2.9	1.6	1.1	2.6	\bar{U}_0
	3.5	2.4	3.2	1.6	1.1	2.9	\bar{U}_m
	0.11	0.09	0.08	0.18	0.14	0.11	σ/\sqrt{n}
30	3.7	2.5	3.5	2.0	1.1	3.0	\bar{U}_0
	3.7	2.5	3.6	2.0	1.1	3.2	\bar{U}_m
	0.04	0.05	0.04	0.07	0.10	0.05	σ/\sqrt{n}
40	3.8	2.7	4.0	2.3	1.5	3.4	\bar{U}_0
	3.9	2.7	3.9	2.3	1.4	3.5	\bar{U}_m
	0.03	0.05	0.04	0.08	0.08	0.05	σ/\sqrt{n}
50	3.7	2.9	4.4	2.6	1.3	3.6	\bar{U}_0
	3.9	2.7	4.2	2.7	1.6	3.7	\bar{U}_m
	0.09	0.15	0.07	0.13	0.21	0.10	σ/\sqrt{n}
60	3.6	2.6	4.7	2.9	1.6	3.7	\bar{U}_0
	4.0	2.8	4.5	3.0	1.7	3.9	\bar{U}_m
	0.13	0.17	0.09	0.18	0.23	0.13	σ/\sqrt{n}
70	3.6	2.4	4.9	2.9	1.6	3.8	\bar{U}_0
	4.1	2.9	4.8	3.3	1.8	4.1	\bar{U}_m
	0.18	0.44	0.12	0.30	0.21	0.18	σ/\sqrt{n}
80	3.7	2.5	5.1	3.0	1.7	4.0	\bar{U}_0
	4.1	3.0	5.1	3.6	2.0	4.3	\bar{U}_m
	0.19	0.44	0.15	0.41	0.18	0.20	σ/\sqrt{n}
90	3.9	2.7	5.3	3.2	1.9	4.2	\bar{U}_0
	4.2	3.0	5.3	3.9	2.1	4.5	\bar{U}_m
	0.21	0.38	0.17	0.51	0.23	0.23	σ/\sqrt{n}
100	4.0	3.0	5.6	3.2	2.1	4.3	\bar{U}_0
	4.2	3.1	5.6	4.2	2.2	4.7	\bar{U}_m
	0.23	0.27	0.19	0.63	0.35	0.27	σ/\sqrt{n}
120	4.0	3.7	5.9	3.2	2.3	4.5	\bar{U}_0
	4.3	3.1	6.1	4.8	2.5	5.2	\bar{U}_m
	0.23	0.55	0.27	0.79	0.56	0.37	σ/\sqrt{n}
150	3.9	4.1	6.2	3.2	3.0	4.6	\bar{U}_0
	4.3	3.2	6.7	5.7	2.8	6.2	\bar{U}_m
	0.20	0.62	0.38	1.06	0.65	0.50	σ/\sqrt{n}
n	18	2	31	8	5	64	



Sl. 2. Srednji profili brzine vjetra pri nestabilnoj stratifikaciji; puna linija - modelirani, isprekidana linija - mjereni profili.

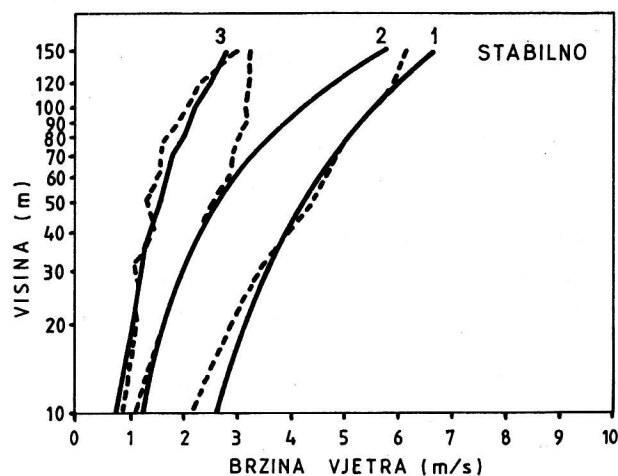
Fig. 2. Mean wind speed profiles under unstable atmosphere stratification; solid line - modelled, dashed line - observed profiles.



Sl. 3. Srednji profili brzine vjetra pri neutralnoj stratifikaciji; puna linija - modelirani, isprekidana linija - mjereni profili.

Fig. 3. Mean wind speed profiles under neutral atmosphere stratification; solid line - modeled, dashed line - observed profiles.

Sl. 2 - 4 prikazuju zaista značajne razlike u srednjim profilima vjetra pri pojedinim stabilnostima. Već sam taj vizualni prikaz ukazuje da je pojedinačan pristup u modeliranju vjetra pri tako definiranim stabilnostima atmosfere opravdan.



Sl. 4. Srednji profili brzine vjetra pri tri kategorije stabilne stratifikacije atmosfere; 1 - pri $0 < R_B < 0.6$, 2 - pri $0.6 < R_B < 1.1$, 3 - pri $1.1 < R_B < 2.5$; puna linija - modelirani, isprekidana linija - mjereni profili.

Fig. 4. Mean wind speed profiles under the three categories within stable stratification; solid line - modelled, dashed line - observed profiles; 1 - for $0 < R_B < 0.6$, 2 - for $0.6 < R_B < 1.1$, 3 - for $1.1 < R_B < 2.5$.

Rezultati usporedbe proračunatih i izmjerenih profila vjetra prikazani u tab. 1 potvrđuju vrlo dobro podudaranje tih profila.

Prosječna srednja apsolutna odstupanja svih modeliranih profila po pojedinim nivoima prikazana su u zadnjem stupcu tab. 1. S obzirom na srednju brzinu vjetra ona su iznosila od 1.3 do 8.0 % brzine na pojedinim nivoima. Neočekivano veliko odstupanje uočeno je na visini od 10 m (5.8 %). Budući da je na promatranoj lokaciji model namijenjen praktičnoj primjeni te da je na toj lokaciji podatak o vjetru na 10 m dostupan i mjerenjem, nije provedeno korigiranje modela zbog tog odstupanja. Osim toga, 5.8 % srednje brzine vjetra na 10 m visine iznosi tek 0.141 ms^{-1} .

Bolja prilagodba profila vjetra postignuta je u onim klasama stabilnosti koje su imale veću čestinu. Zato profili vjetra modelirani za nestabilna stanja kojih je ukupno bilo 18 i za jedan od tipova vrlo stabilne stratifikacije koja je nastupila 31 puta najbolje simuliraju realna stanja. Zbog prirode

nestabilnog stanja atmosfere, koje je karakterizirano jakim izmiješanošću po vertikali, profili brzine vjetra su mnogo izglađenijeg oblika nego pri ostalim stabilnostima. Upravo zbog oba navedena razloga, profili vjetra pri nestabilnoj stratifikaciji atmosfere su modelom najbolje simulirani profili.

Model profila vjetra koji je korišten važeći je jedino u prizemnom sloju jer je na bazi njegove fizike izvorno i izveden. Međutim, ovdje je testirana njegova primjenljivost do visine od 150 m, bez obzira što je to u mnogim slučajevima iznad prizemnog sloja. Visina prizemnog sloja ovisi o stabilnosti atmosfere. Budući da je visina stabilno stratificiranog prizemnog sloja u prosjeku najmanja, znatno veća odstupanja teoretskog profila pri tim stabilnostima u višim slojevima nego u nižim, (Tab. 1 - stabilne stratifikacije za koje je $R_B > 0$) mogu se objasniti niskim stabilnim prizemnim slojem. Ipak, mnoga motrenja pri stabilnoj stratifikaciji pokazala su da je profil vjetra još i iznad prizemnog sloja često dobro prikazan profilima konstruiranim prema Monin-Obukhovoju teoriji (Sundararajan, 1979, Carl et al., 1973).

Prijelaz stabilne stratifikacije u neutralnu stratifikaciju atmosfere na manjim visinama česta je pojava. Ta pojava se može oučiti i na temelju nagle promjene oblika profila vjetra, kao npr. na sl. 4. na jednom osrednjenom mjerenom profilu (profil br. 2). Primijenjenim modelom nije moguće simulirati profile vjetra pri promjeni stabilnosti atmosfere visinom, te otuda potječu i veća odstupanja teoretskog i mjenog profila na većim visinama.

Nadalje, usporedba triju teoretskih krivulja profila vjetra pri stabilnoj stratifikaciji atmosfere na sl. 4. ukazuje na postojanje specifične stabilnosne kategorije unutar stabilne stratifikacije - krivulja 2. To je stabilnosna kategorija koja je po pripadnoj stratifikaciji temperature (gradijentu temperature) vrlo slična stratifikaciji pri profilu 3 na istoj slici. Međutim, specifičnost spomenute stabilnosne kategorije je srednja brzina vjetra na 35 m koja je mnogo veća nego u kategoriji 3. Zbog spomenutih meteoroloških veličina koje predstavljaju ulazne podatke za

računanje profila vjetra 2, a koje, svaka pojedinačno, ne predstavljaju srednje veličine odgovarajućih pri stabilnostima 1 i 3, profil 2 nema očekivani - neki "srednji" oblik i nagib između profila 1 i 3. Naime, kao što je već spomenuto, kategoriziranje stabilnosti provedeno je isključivo preko vrijednosti združenog parametra R_B određenog preko međusobnog odnosa spomenutih ulaznih veličina.

U uvodu je napomenuto da su već izvođeni i teoretski profili vjetra za cijeli granični sloj. Slično kao i u Monin-Obukhovoju teoriji i ovi profili definirani su pomoću bezdimenzionalnih gradijenata ovisnih o bezdimenzionalnoj visini. Ali, ovdje se bezdimenzioniranje provodi na složeniji način. Yamada je predložio da se kao skala duljine danju koristi visina donje baze inverzionog sloja, a noću tzv. debljina turbulentnog sloja (Yamada, 1976). Nadalje, kao skalu brzine on u svoju teoriju uključuje brzinu geostrofičkog vjetra. Određivanje ovih parametara u promatranom slučaju predstavljalo bi dodatni i nesavladiv problem. Naime, utvrđeno je da se oni ne mogu dovoljno pouzdano odrediti na temelju opisanog eksperimenta. Zato ova teorija na promatranju lokaciji nije bila primijenjena.

8. Zaključak

Primjena Monin-Obukhove teorije sličnosti u operativnom određivanju profila vjetra u prizemnom sloju atmosfere ima fizikalno opravdanje za razliku od uobičajeno korištenih eksperimentalno utvrđenih matematičkih zakonitosti.

Opisani model temeljen je na ulaznim podacima koji su svakodnevno dostupni na promatranju lokaciji. To su podaci temperature zraka mjerene na dvije razine i vjetra mjenog na jednoj razini na meteorološkom stupu postavljenom upravo u tu svrhu.

Posebno je značajno da je, na temelju tih podataka moguće odrediti, vrijednosti stabilnosnih parametara i specifične stabilnosne kategorije, koje su dobra polazna osnova prilagodbe modela stvarnim profilima vjetra. Dakako, na promatranom području bi dulji period specijalnih mjerenja omogućio

bolje upoznavanje lokalnih karakteristika prizemnog sloja i njihovo kategoriziranje.

U modelu se koristi i univerzalni stabilnosni parametar L čije vrijednosti se određuju iterativnom metodom. Uvođenje iteracije u model ne povećava znatno računsko vrijeme jer se zadovoljavajuća konvergencija obično postiže već u trećem koraku, no iteracijom se preciznije određuje vrijednost univerzalnog parametra, što posredno poboljšava i sam simulirani profil vjetra.

Usporedbom parametara odstupanja modeliranih od stvarnih profila vjetra na promatranj lokaciji i istih parametara odstupanja profila vjetra modeliranog na bazi istog tipa ulaznih parametara, ali npr. u Nizozemskoj (Holtslag, 1984), utvrđeno je da su simulacije približno jednako uspješne.

Zahvala: Zahvaljujem se dr. Nadeždi Šinik, izv. prof. na korisnim savjetima za pojašnjenje prve verzije rukopisa.

Literatura

- Arya, S.P., 1990: Finite-Difference Errors in Estimation of Gradients in the Atmospheric Surface Layer. *J. Appl. Meteorol.* **30**, 251-253.
- Businger, J.A., J.C. Wyngaard, Y. Izumi and E.F. Bradley, 1971: Flux Profile Relationships in the Atmospheric Surface Layer. *J. Atmos. Sci.*, **28**, 181-189.
- Businger, J.A., 1973: Turbulent Transfer in the Atmospheric Surface Layer. Workshop on Micrometeorology, D.A. Haugen, Ed., Amer. Met. Soc., 67-100.
- Carl, D. M., Tarbell, T. C., and Panofsky, H. A., 1973: Profiles of Wind and Temperature from Towers Over Homogeneous Terrain. *J. Atmos. Sci.* **30**, 788-794.
- Cvitan, L., 1991: Power Law Wind Profile Over Hilly Terrain. Zbornik radova sa XV konferencije za Karpatsku meteorologiju, Užgorod, 16-21. 09. 1991, 120-125.
- Hanna, S.R. and H.A. Panofsky, 1969: Estimation of the 90 m Wind from Low - Level Observations. WMO Technical Note No 93: Vertical Wind Shear in the Lower Layers of the Atmosphere, 219-248.
- L. Cvitan: Profil vjetra u prizemnom sloju atmosfere
- Holtslag, A.A.M., 1984: Estimates of Diabatic Wind Speed Profiles from Near-Surface Weather Observations. *Bound. Layer Meteor.*, **29**, 225-250.
- Hogstrom, U., 1988: Nondimensional Wind and Temperature profiles in the Atmospheric Surface Layer: A re-evaluation. *Bound. Layer Meteor.* **42**, 55-78.
- Hsu, S.A., 1982: Determination of the Power-Law Wind Profile Exponent on a Tropical Coast. *J. Appl. Meteor.*, **21**, 1187-1190.
- Jofre, S.M., 1984: Power Laws and the Empirical Representation of Velocity and Directional Shear. *J. Clim. Appl. Meteor.*, **23**, 1196-1203.
- Kondo, J. and H. Yamazawa, 1986: Aerodynamic roughness over an inhomogeneous ground surface. *Bound.-Layer Meteor.*, **35**, 331-348.
- Koraćin, D. i I. Mastnak-Car 1983: Procjena univerzalnih parametara graničnog sloja atmosfere iterativnom metodom, Zbornik radova sa V znanstvenog skupa "Proračunavanje i projekiranje pomoću računala", Stubičke toplice, 555-559.
- Korell, A., H.A. Panofsky and R.J. Rossi: 1982: Wind Profiles at the Boulder Tower. *Bound. Layer Meteor.* **22**, 295-312.
- Stull, R.B., 1988: An Introduction to Boundary Layer Meteorology. Kluwer Academic, 666 pp
- Sedefian, L., 1980: On the Vertical Extrapolation of Mean Wind Power Density. *J. Appl. Meteor.*, **19**, 488-493.
- Sundararajan, A., 1979: Some Aspects of the Structure of the Stably Stratified Atmospheric Boundary Layer. *Bound. Layer Meteor.* **17**, 133-139.
- Tennekes, H. and J.L. Lumley, 1972: A First Course in Turbulence. The MIT Press, Cambridge, 300 pp.
- Touma, J.S., 1977: Dependence of the Wind Profile Power Law on Stability for Various Locations. *J. Air Pollut. Control Assoc.*, **27**, 863-866.
- Wieringa, J.C., 1973: On Surface Layer Turbulence. Workshop on Micro meteorology, D.A. Haugen, Ed., Amer. Met. Soc., 67-100.
- Yamada, T., 1976: On the Similarity Functions A, B, and C of the Planetary Boundary Layer. *J. Atmos. Sci.*, **33**, 781-793.

Summary

This paper discusses the possibilities of routine application of the Monin-Obukhov theory in wind profile simulation. The input

data are air temperature at 2 and 35 m, wind speed at 35 m and a constant value for surface roughness length z_0 determined on the basis of terrain classification by Wieringa (1980).

At the locality considered, the wind profiles were first analysed under the three main stability classes. This analysis suggested that some additional classes had to be defined within the stable stratification. This was done on the basis of the values of bulk Richardson number (R_B).

The dynamic processes from one to

the other class mentioned above are rather different. Therefore, for each of these classes particular local functions (based on the universal function formulation) were derived and included in the model. To improve the accuracy of some important similarity theory parameters the iterative method was used.

A comparison of modelled wind profiles with measured ones indicated that the simulation was rather good. Still, the model could be tested under different conditions which would enable us to improve it by means of the method explained in this paper.