



## Idealizirani vjetar obronka

Branko Grisogono<sup>1</sup>

### Uvod

U ovom se članku bavimo silaznim i uzlaznim vjetrom koji puše niz padinu ili strminu relativno malog nagiba kuta  $\alpha$  prema horizontali; recimo, između  $1^\circ < \alpha < 10^\circ$ , ili još jednostavnije i grublje,  $\alpha \sim 0.1$  radijan. Ovisno o dijelu dana i pripadnoj (ne)dozračenju energiji od Sunca, vjetar obronka puše ili niz (noćno hlađenje tla) ili uz (dnevno grijanje iste podloge) padinu. Bit mehanizma vjetra obronka jest horizontalna temperaturna razlika između obronka, tj. nagnutog terena, i okolnog zraka na istoj apsolutnoj visini dalje od obronka (npr. Mahrt, 1982; Egger, 1990). Ova temperaturna razlika dovodi do neravnoteže tlaka zraka, a ova pak tjera zrak (vjetar!) da se giba s malog područja relativno višeg tlaka u malo područje<sup>2</sup> relativno nižeg tlaka. Ako je obronak topliji od okoliša (tijekom dana tlo se brže i jače zagrijava od zraka koji je dobar izolator topline), zrak koji leži tik uz obronak počinje se spontano podizati i kliziti uz obronak, a zrak na istoj visini podalje od obronka se spušta jer postaje relativno teži od zraka uz obronak. I suprotno: noću se podloga jače hladi od slobodnog zraka dalje od obronka pa stoga zrak uz nagnutu podlogu (obronak) spontano tone, tj. klizi nizbrdo. Ovaj vjetar puše u tzv. *graničnom sloju atmosfere*, tj. u najdonjem sloju zraka koji je stalno pod utjecajem podloge (grijanje, hlađenje i trenje).

Dakle, glavni mehanizam idealiziranog vjetra obronka je termodinamičke prirode. Budući da većina kopna na Zemlji nije horizontalna, vjetar obronka je važna komponenta mikroklimatskih osobina različitih krajeva; npr. ovaj tip vjetra sudjeluje u prirodnom provjetranju mnogih gradova, a u sprezi sa smorcem i kopnenjakom (koji čine obalnu cirkulaciju zraka) može biti bitan za lokalno meteorološko vrijeme i kakvoću zraka za skoro 40% čovječanstva (procjenjuje se da toliko ljudi živi uz planine i obale). Slika 1 prikazuje meteorološki toranj za mjerenje prizemnog strujanja zraka. Ovaj toranj je visine 60-ak metara, ima ispružene krakove s ultrazvučnim uređajima za mjerenje trokomponentnog strujanja zraka (vektor!), te temperature i relativne vlažnosti zraka na više nivoa. Njime se može solidno mjeriti vjetar obronka dubine 20 do 50 m (ako ovaj ne puše kroz toranj). Između ostalog, ovakva su mjerenja potrebna za racionalniju izgradnju vjetrenjača za proizvodnju električne energije, bolje planiranje položaja budućih zračnih luka, itd.

<sup>1</sup> Redoviti je profesor na Geofizičkom odsjeku Prirodoslovno-matematičkog fakulteta u Zagrebu, e-pošta: <http://www.pmf.unizg.hr/geof>

<sup>2</sup> Područje mora biti relativno malo, jer ako je veliko, onda se pojavljuje dodatna dinamika (uzgonski valovi, rotacija Zemlje, itd.) koja može bitno utjecati na smjer gibanja zraka. Na primjer, ako su horizontalne dimenzije relativno niskog tlaka više stotina kilometara, to dovodi do stvaranja ciklone i kad zrak krene k njenom središtu, počne kružiti (u smjeru suprotnom od kazaljke na satu) oko njega zbog rotacije Zemlje.

Vjetar obronka puše na svim kontinentima, od Antarktika na ovamo. Postiže brzinu od 10-ak  $\text{ms}^{-1}$ , može biti vrlo redovit i perzistentan, jer dovoljno je da obronak bude dugačak barem 1–2 km. Debljina (ili dubina) mu je ponekad tek 2–3 m, ali može narasti i do nekoliko stotina metara. Redovito se javlja na Grenlandu, u Alpama, Bilogori, Medvednici, Papuku, Velebitu, te na otocima poput Brača, Cresa, Hvara, Visa, itd. Iako slaba bura može ponekad biti vjetar ovog tipa, poznata, prava (jaka do olujna) bura nije vjetar obronka<sup>3</sup>. No, olujna bura nije tema ovog rada, već idealizirani (“čisti”) vjetar obronka koji najčešće ima linearnu prirodu (tj. u principu jednoznačno rješive jednadžbe).

U nastavku ćemo navesti neke činjenice o mjerenju i numeričkom modeliranju spomenutog strujanja; fokus će biti na uvođenje jednog od najboljih analitičkih (teorijskih) modela vjetra obronka (Prandtlov model). Uz diskusiju, pokazat ćemo primjere i zadati nekoliko prikladnih zadataka. U ovom pristupu neophodno je uvesti potrebne definicije i objasniti spregu između osnovne jednadžbe gibanja (Newtonov zakon gibanja za fluide, ovdje zrak) i zakona termodinamike.



*Slika 1. Meteorološki toranj na Pometnom brdu kraj Dugopolja (sjeveroistočno od Splita), na oko 618 m nadmorske visine. Toranj pripada Energetskom institutu Hrvanje Požar (EIHP) u suradnji s Institutom Rade Končar. Mjerni uređaji, međusobno udaljeni oko 10 m, visokog uzorkovanja podataka pripadaju EIHP-u te Geofizičkom odsjeku PMF-a u suradnji s Državnim hidrometeorološkim zavodom. Žice sa strane pridržavaju toranj. Na nebu se vide i tanki oblaci. Snimio: Željko Večenaj (Geofizički odsjek PMF-a u Zagrebu).*

## Terenska mjerenja i modeli

U geofizici, gdje pripada i atmosferska fizika s meteorologijom, mjerenja predstavljaju najveće i nenadoknadivo bogatstvo – jer mi živimo u našem laboratoriju – na dnu oceana što se zove atmosfera. Instrumenti za mjerenja na terenu trebaju biti robusni, u stanju

<sup>3</sup> Na Wikipediji pogrešno piše da je bura tzv. katabatički (niz obronak) vjetar – to je staro, pogrešno poimanje jake i olujne bure koja u stvari ima nelinearnu prirodu, i kod koje dolazi do savijanja i nerijetko loma planinskih atmosferskih valova.

da podnesu temperaturne ekstreme, skromno napajanje strujom (akumulatori, sunčeve ćelije, tek ponekad električni agregati ili uobičajena električna mreža) i neredoviti obilazak motritelja, ali uz pouzdano pospremanje mnogobrojnih podataka. Uređaji na slici 1 su bili posjećivani tek nekoliko puta godišnje (tijekom skoro dvije godine), ali je njihov rad putem interneta bio pomno praćen. Na prikupljenim se podacima obavljaju korekcije obzirom na nagib terena, gruba analiza kvalitete podataka i pogrešaka, odabir situacija strujanja za detaljnije dalje proučavanje, izračun osnovnih i izvedenih varijabli strujanja, itd. Sirovi podaci se uvijek posebno čuvaju na barem dva računala i na vanjskim diskovima.

Drugu važnu komponentu geofizike (ovdje atmosferske fizike) čine numerički modeli, točnije simulatori. Budući da je u laboratoriju teško ostvariti pripadne atmosferske uvjete dinamičke i geometrijske sličnosti strujanja, najčešće se pribjegava kompleksnom numeričkom simuliranju proučavanih atmosferskih pojava pomoću osnovnih jednadžbi očuvanja gibanja, energije i mase. Ovakvi sustavi nelinearnih jednadžbi što opisuju stanje i gibanje atmosfere rješavaju se na velikim i brzim računalima. Isti postupak se provodi, u biti, u prognozi vremena i projekcijama buduće i prošle klime. Numeričke metode uključuju diskretizaciju osnovnih jednadžbi, definiranje tzv. početnih i rubnih uvjeta te različite statističke procedure za procese koji se događaju na prostorno-vremenskim skalama koje ne mogu biti razlučene pripadnim modelom, ali su dovoljno važne da ne smiju biti zanemarene. Na primjer, izračun padanja svake pojedine kapljice kiše je preskup<sup>4</sup>; stoga se izračunava nivo kondenzacije, procjena količine vodene pare u zraku nad nekim područjem, te se onda procjenjuje prosječna količina oborine tijekom nekoliko npr. sati iznad promatranog područja (iznad npr.  $3 \times 3 \text{ km}^2$ ).

I konačno, treću neizostavnu komponentu atmosferske fizike čine analitički (teorijski u užem smislu) modeli. Sve tri spomenute osnovne znanstvene komponente, tj. mjerenja, simulacije (ovdje najčešće numeričke) i analitika, stvaraju opću teoriju, odnosno poimanje i spoznaje o prirodi atmosfere. Slično funkcioniraju sva područja fizike, s navedene tri osnovne znanstvene sastavnice, stvarajući tako pouzdane spoznaje o svijetu. Do sada smo u najkraćim crtama prepričali osnovne atmosferskih mjerenja i modeliranja vjetrova obronka. U nastavku ćemo se posvetiti jednom solidnom analitičkom modelu vjetrova obronka.

## Prandtlov model idealiziranog vjetrova obronka

Prije definiranja samog modela i predstavljanja pripadnog rješenja za vjetar obronka, potrebno je uvesti nekoliko definicija iz dinamičke meteorologije. Potencijalna temperatura je funkcija obične apsolutne temperature  $T$  i tlaka  $p$ , uz nekoliko konstanti koje slijede, tj.

$$\Theta = T \left( \frac{p_0}{p} \right)^{R/C_p}, \quad (1)$$

gdje je  $p_0$  referentni tlak, obično  $p_0 = 1000 \text{ mb}$  ( $= 10^5 \text{ Pa}$ ),  $R$  je opća plinska konstanta i  $C_p$  pripadna specifična toplina uz konstantan tlak; za naše potrebe važan je samo njihov omjer i ovaj iznosi  $\kappa \approx 0.286$ . Temperatura  $\Theta$  je izvedena na osnovi 1. i 2. zakona termodinamike,  $\Theta$  je očuvana u suhim adijabatičkim procesima, tj. u

<sup>4</sup> Inače, račun bi predugo trajao i na najbržim super-računalima, stoga se pogreške trebaju prihvatiti i uvažiti kao dio današnje točnosti i pripadne (ne)pouzdanosti prognoze vremena. Konkretno, prognoze oblaka i oborine su jedni od najnesigurnijih faktora prognoze vremena (isto vrijedi i kod klimatskih projekcija).

procesima u kojima određeni volumen zraka (tzv. *čest* zraka), bez ikakvog sudjelovanja kapljica i leda, ne razmjenjuje toplinu s okolišem. Ova konzervativnost, tj. očuvanost  $\Theta$  je razlog da smo ju ovdje uveli. U prosjeku  $\Theta$  raste s visinom jer  $p$  relativno brže opada s visinom nego pripadna  $T$ . Na primjer, na visini od oko 5 km iznad razine mora,  $p \approx 500$  mb, tj.  $p$  opada na približno polovicu svoje morsko-površinske vrijednosti (tlak zraka opada eksponencijalno s porastom visine); međutim, pripadni  $T$  opada od neke svoje vrijednosti iznad razine mora od, recimo,  $T \approx 285$  K na, otprilike,  $T \approx 245$  K, na istoj visini od 5 km, što je promjena od svega  $\sim 15\%$  početne površinske vrijednosti od  $T$ . Uvrstimo li ove veličine u (1), vidimo da  $\Theta$  raste s visinom.

Prandtlov model (1942.) vjetra obronka opisuje pripadno strujanje na najjezgrovitiji način tako da povezuje osnovnu komponentu gibanja zraka (recimo niz obronak, tj. noću) s pripadnom termodinamičkom, tj. toplinskom promjenom. Početno ubrzanje česti zraka nizbrdo noću, jer se tlo brže hladi od zraka okoliša na istoj visini (ili uzbrdo danju, jer se tlo brže grije), je uravnoteženo turbulentnim<sup>5</sup> (internim) trenjem zraka. Drugim rječima, negativan ili pozitivan uzgon (noću ili danju) je uravnotežen turbulentnim trenjem i tako se postiže približno konstantna brzina vjetra u vremenu,  $U(z)$ , niz ili uz dugu padinu konstantnog i relativno malog nagiba (npr. Mahrt, 1982; Grisogono i Oerlemans, 2001).

Uskoro dolazimo do samog rješenja proučavanog, relativno plitkog gibanja zraka na obronku, tj. u *graničnom sloju* atmosfere iznad nagnutog terena. Potrebno je definirati prikladne rubne i početne uvjete. Tražimo stacionarno rješenje strujanja, tj. profil vjetra koji puše paralelno obronku i više ne ovisi o vremenu, nego samo o visini okomito na obronak,  $z$ ; isto vrijedi i za pripadni profil potencijalne temperature, tj.  $\Theta(z)$ . Vjetra nema na samom tlu, tj. za njegovu brzinu vrijedi  $U(z=0) = 0$  (česti zraka se lijepe na tlo, nakupine molekula zraka na tlu se teško razmiču jedna od druge i od same podloge). Na velikoj visini, daleko od podloge, također nema vjetra zbog dnevnog hlađenja ili grijanja podloge tijekom nekoliko sati, tj.  $U(z \rightarrow \infty) = 0$  (jer miran zrak na npr. 10 km visine “ne zna” za mali brežuljak duboko ispod). Temperaturna neravnoteža je opisana tako da je podloga na konstantnoj razlici (suficitu ili deficitu, ovisno da li se radi o dnevnom strujanju uz obronak ili noćnom strujanju niz obronak) prema osnovnoj, osrednjennoj atmosferi,  $\Theta(z=0) = C$ . U biti, ova idealizirana konstantna temperaturna razlika na tlu,  $C$ , tjera ili forsira proučavano strujanje obronka! Stoga, uvijek za rješenje temperaturnog profila poremećaja  $\Theta$  (sada *razlika* između srednje temperature  $\theta$  atmosfere i pripadnog diskontinuiteta te iste temperature na tlu) je kvalitativno sličan pripadnom uvjetu za vjetar; poremećaj mora odumrijeti u velikoj visini, tj.  $U(z \rightarrow \infty) = 0$ ,  $\Theta(z \rightarrow \infty) = 0$ .

Rješenja ovakvog modela su eksponencijalno gušće trigonometrijske funkcije:

$$U(z) = -C\mu \exp\left(-\frac{z}{h}\right) \sin\left(\frac{z}{h}\right), \quad \Theta(z) = C \exp\left(-\frac{z}{h}\right) \cos\left(\frac{z}{h}\right), \quad (2)$$

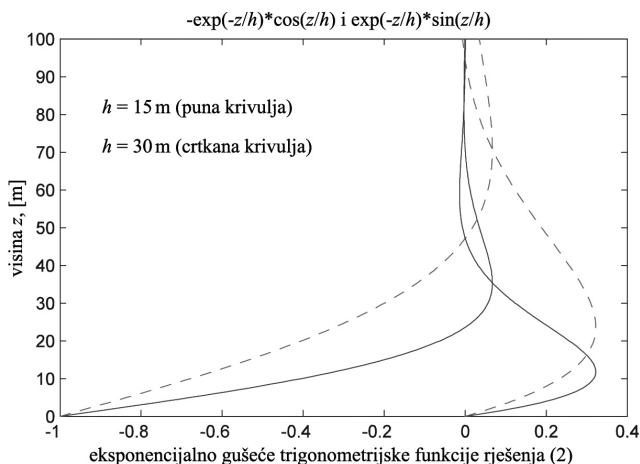
gdje je  $h$  karakteristična visina Prandtlovog sloja, dok  $\mu$  dimenzijski skalira brzinu, tj.

$$h = \left(\frac{4K_m K_h \theta_{00}}{g\gamma \sin^2(\alpha)}\right)^{1/4}, \quad \mu = \left(\frac{g}{\theta_{00}\gamma Pr}\right)^{1/2}. \quad (3)$$

Pretpostavljene konstante su ubrzanje sile teže,  $g$ ,  $\gamma \equiv \Delta\theta_0/\Delta z^*$ ,  $\Delta z^*$  je mala visinska razlika na pravoj vertikali na kojoj postoji pripadni mali prirast  $\Delta\theta_0$ ,  $\theta_{00}$  je

<sup>5</sup> Turbulencija u fluidima, što je također i zrak, je pojačano, jako kaotično gibanje. To je jedno od principijelno neriješenih problema klasične i kvantne fizike. Za fluide turbulencija se opisuje kroz nekoliko povezanih formulacija, npr. značajno miješanje fluida, difuzivnost, rastezanje vrtloga, itd. Za kompletan opis turbulencije još ne postoji adekvatna matematika i fizika; stoga se koriste perturbativne i numeričke metode za djelomičan opis pojedinih tipova realizacija turbulentnog gibanja.

referentna temperatura, npr. 273 K,  $K_m$  i  $K_h$  su tzv. vrtložne difuzivnosti<sup>6</sup> za vjetar i temperaturu, a njihov omjer (nema dimenzije) je Prandtlov broj  $Pr \equiv K_m/K_h$ . Dakle pretpostavljeni vertikalni profil neporemećene potencijalne temperature  $\theta(z)$  je pravac tipa  $\theta(z^*) \approx \theta_{00} \pm |C| + \gamma z^*$ . Razlika između  $z$  i  $z^*$  je nekoliko stupnjeva, tj.  $\alpha$  i uglavnom je nebitna za atmosferske procese u najdonjem, tj. *graničnom sloju*. Nadalje, dimenzije od  $K_m$  i  $K_h$  moraju biti  $[m^2s^{-1}]$  da  $h$  u (3) bude visina. Vidimo iz (2) da je vjetar  $U(z)$  nula na tlu (sinus od nule jednak je nuli) i u beskonačnosti – kao što zahtijevaju pretpostavljeni rubni uvjeti i fizikalna intuicija. Nadalje,  $\Theta(z)$  je minimalna (najjače hlađenje) na tlu,  $\Theta(z=0) = C$  ako je  $C < 0$ ; odnosno,  $\Theta(z)$  je maksimalna (najjače grijanje) na tlu ako je  $C > 0$ , što je također u skladu s rubnim uvjetima i fizikalnom intuicijom. Slika 2 prikazuje rješenja (2) bez pripadnih amplituda. Vidi se da je strujanje relativno pliće za manju vrijednost  $h$  (puna krivulja) i brže se mijenja s visinom, nego isto rješenje za veći  $h$  (crtkana); dakle,  $h$  doista opisuje debljinu karakterističnog sloja kroz koji se promatrane funkcije najviše mijenjaju. Zbog konciznosti, nadalje se uglavnom bavimo silaznim vjetrom obronka. U suprotnom, prikladno je nacrtati sličnu sliku, ali za  $C > 0$ ; takva bi slika prikazivala funkcije  $\exp(-z/h) \cos(z/h)$  te  $-\sin(-z/h) \sin(z/h)$ .



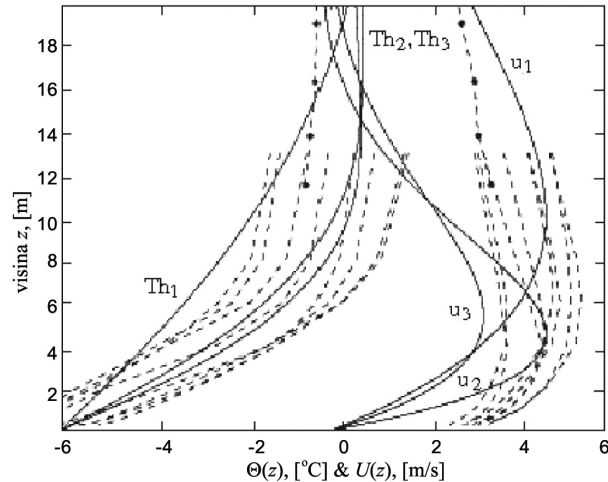
Slika 2. Vertikalni profili idealiziranog rješenja (2) koje odgovara silaznom vjetru obronka, prikazani bez pripadnih amplituda radi jednostavnosti. Potencijalna temperatura je uglavnom na lijevoj, a brzina vjetra uglavnom na desnoj dijelu grafa. Na y-osi je neovisna varijabla, visina  $z$ .

Slika 3 prikazuje vertikalne profile tipičnog silaznog vjetra obronka. Tu su prikazana i mjerenja (crtkano) na malom tornju visine 13 m; na to se nastavlja jedan vertikalni profil meteorološkim balonom (mali cepelin na uzici što nosi meteorološke instrumente). Mjerenja sugeriraju da je pripadni silazni vjetar (niz obronak) prilično stabilan i stalan, tj. perzistentan, barem za ovaj promatrani dan na ledenjaku Pasterze u Alpama, 27. 07. 1994. Ovakva mjerenja su važna za proučavanje topljenja ledenjaka (oko 90% ledenjaka<sup>7</sup> na

<sup>6</sup> Što je veća spomenuta vrtložna, tj. turbulentna difuzivnost, jače je vrtloženje zraka, to je jača i turbulencija. Vrijednosti ovih koeficijenata jako variraju u stvarnosti u prostoru i vremenu i funkcije su samog strujanja.

<sup>7</sup> Ledenjaci su “barometri klime”; kada se značajno smanjuju, dolazi do dugoročnog zagrijavanja pripadnog šireg lokaliteta (suprotno vrijedi za povećavanje ledenjaka).

Zemlji se topi zadnjih desetljeća što je očita posljedica globalnog zagrijavanja) jer, pored najvažnijeg, tj. zračenja, turbulentno zagrijavanje ledenjaka igra važnu ulogu u promjeni mase ledenjaka. Turbulentno zagrijavanje (ili hlađenje) se računa na osnovi  $U(z)$ ,  $\Theta(z)$  i procjene  $K_m$  i  $K_h$ .



Slika 3. Vertikalni profili silaznog vjetra obronka:  $\Theta(z)$ , [ $^{\circ}\text{C}$ ], se nalazi uglavnom na lijevom, a  $U(z)$ , [ $\text{ms}^{-1}$ ], na desnom dijelu grafa ( $x$ -os). Na  $y$ -osi je visina  $z$ , [ $\text{m}$ ]. Mjerenja na mikrometeorološkom tornju s 8 nivoa su prikazana crtkano, to su trosatni srednjaci tijekom jednog cijelog dana; jedna sondaža balonom se nastavlja na podatke s tornja (crtkano s točkama). Maksimum vjetra je na 4-6 m visine, dok je karakteristična debljina strujanja oko 20 m. Pune krivulje su 3 idealizirana rješenja (2) za 3 različite skupine ulaznih podataka: za  $\Theta(z) \iff (Th_1, Th_2, Th_3)$  te za  $U(z) \iff (u_1, u_2, u_3)$  što uglavnom idu redom odozgo prema dolje.

Na slici 3 vidimo da Prandtlov model kvalitativno dobro prikazuje ovo strujanje (usporedi crtkane i pune krivulje). Korišteni ulazni podaci za (2) i (3) su:  $K_h = 0.06 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  za prvi, te  $K_h = 0.12 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  za drugi i treći profil;  $Pr = 2$  za prvi i drugi, te  $Pr = 4$  za treći profil (pune krivulje);  $C = -6^{\circ}\text{C}$ ,  $\gamma = 3 \text{ K}/(1000 \text{ m})$  i  $\theta_{00} = 273.2 \text{ K}$ . Detaljna usporedba mjerenja i Prandtlovog modela ukazuje da je ovdje nemoguće istodobno postići izvrsno kvantitativno međusobno slaganje za  $U(z)$  i  $\Theta(z)$  profile. Isprobano je više desetaka kombinacija ulaznih parametara modela (nije prikazano), no ili je premala promjena temperature visinom, ili je maksimum vjetra na pogrešnoj visini (ili profil vjetra oko maksimuma ima pogrešnu zakrivljenost); ta poteškoća je uvelike riješena modifikacijom modela tako da  $K_m$  i  $K_h$  postanu funkcije visine (Grisogono i Oerlemans, 2001), no time se ovdje nećemo dalje baviti. Dakle, prema slici 3 prihvaćamo da Prandtlov model kvalitativno dobro prikazuje vjetar obronka.

Ponovimo, Prandtlov model daje jednoznačno rješenje strujanja za zadani  $\alpha$ ,  $\gamma$ ,  $C$ ,  $K_m$  i  $K_h$ , tj. ukratko (i bez uobičajenih konstanti radi jednostavnosti):

$$[\alpha, \gamma, C, K_m, K_h] \rightarrow [U(z), \Theta(z)]. \quad (4)$$

Drugim riječima, nagib terena, vertikalna struktura mirne atmosfere i njeno odstupanje od temperature terena, te pripadne turbulentne karakteristike određuju vjetar obronka (brzinu i temperaturu). Nakon što smo prodiskutirali osnovno fizikalno značenje rješenja

za vjetar obronka, prikladno je dati još jedan primjer te nastaviti dalju diskusiju tog strujanja uključujući i pojedine zanimljive detalje i zadatke za vježbu.

Uvrstimo li za vrijednosti u (3),  $K_m = K_h = 1 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ ,  $\theta_{00} = 273 \text{ K}$ ,  $g = 9.81 \text{ ms}^{-2}$ ,  $\gamma = 5 \text{ K}/(1000 \text{ m})$  i  $\alpha = 0.1 \text{ rad}$  ( $\alpha$  ne smije biti nula u ovakvom modelu!), dobijemo da je  $h_p \approx 22 \text{ m}$ . Ako je  $C = -6^\circ\text{C}$  ( $= -6 \text{ K}$  jer se radi o temperaturnoj razlici), onda je  $C\mu = 16.1 \text{ ms}^{-1}$  i radi se o silaznom vjetru (niz obronak). Budući da se funkcijsko rješenje (2) za vjetar  $U(z)$  maksimizira za argument  $z/h_p = \pi/4$  koje iznosi  $\approx 0.32$ , dobijemo da je maksimalna brzina vjetra obronka prema Prandtlovom modelu i za pretpostavljene ulazne podatke jednaka  $\max(U(z)) = 5.2 \text{ ms}^{-1}$ . To je tipična maksimalna brzina vjetra obronka u stvarnosti i primijetimo da je ova ostvarena na visini od  $\pi h_p/4 \approx 17.3 \text{ m}$  iznad samog vjetra obronka nerijetko se javlja i slaba povratna struja suprotnog smjera zbog djelomične kompenzacije mase zraka pa i samo rješenje (2) već ukazuje na promjenu predznaka vjetra i temperature na većoj visini (zbog sinusa i kosinusa).

U noćnoj atmosferi  $K_m$  i  $K_h$  su nerijetko (bar nešto) manji od korištenih vrijednosti u prethodnom primjeru (vidi sliku 3); onda je pripadna karakteristična visina silaznog strujanja  $h_p$  manja. Stoga je i debljina sloja noćnog vjetra niz obronak općenito manja od debljine dnevnog sloja vjetra uz obronak (vidi sliku 2). Dnevni vjetar uz obronak može imati vrijednosti vrtložne difuzivnosti 10-ak i više puta veće od korištenih u našim primjerima, npr.  $(K_m, K_h) = (10, 14) \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ ; nadalje pripadni  $\gamma$  može biti i nešto manji, pa debljina takvog sloja vjetra uz obronak nerijetko prelazi i 200 m. S druge pak strane, najdulji i najdeblji silazni slojevi strujanja su na Antarktici tijekom polarne noći. Takvo strujanje atmosferskog graničnog sloja je i pod utjecajem rotacije Zemlje (npr. Kavčić i Grisogono, 2007.), ima karakterističnu dubinu od nekoliko stotina metara i razvija brzine preko  $12 \text{ ms}^{-1}$ .

---

## Zaključak i zadaci

---

Vidjeli smo da eksponencijalno gušći valovi dobro opisuju osnovno strujanje niz ili uz obronak (Prandtlov model). Što je veća površinska razlika između temperature tla i atmosfere istog nivoa ( $C$ ), to je jači vjetar obronka; nadalje, jače turbulentno miješanje zraka ( $K_m$  i  $K_h$ ) i sporija vertikalna promjena temperature neporemećene atmosfere ( $\gamma$ ) dovode do dubljeg strujanja niz ili uz obronak. Za vježbu i bolje razumijevanje idealiziranog vjetra obronka evo nekoliko zadataka što se nastavljaju na slike 2 i 3 te na diskutirane primjere.

1. Nacrtajte i diskutirajte  $U(z)$ ,  $\Theta(z)$  prema (2) i (3) za  $\alpha = 2.5^\circ$ , odnosno  $10^\circ$ ; ostali ulazni podaci kao u danom primjeru iza (4).
2. Isto kao zadatak 1, ali za  $C = +7^\circ\text{C}$ .
3. Isto kao zadatak 1, ali za  $\gamma = 2 \text{ K}/(1000 \text{ m})$ , odnosno  $7 \text{ K}/(1000 \text{ m})$ .
4. Isto kao zadatak 1, ali za  $K_m = 0.4 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ , odnosno  $1.6 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ . Izračunajte i pripadni Prandtlov broj  $Pr$ . Kako ovisi dubina i brzina strujanja o  $Pr$ ?

Za još realnije primjere, koji više odgovaraju stvarnosti i dnevnom hodu vjetra obronka,  $K_m$  i  $K_h$  za  $C > 0$  trebaju biti uvijek veći od onih za  $C < 0$ .

## Zahvala

---

Zahvaljujem se Željku Večenaju na fotografiji meteorološkog tornja na Pometenom brdu i svim institucijama navedenim ispod slike 1, te uključenim u pripadno istraživanje. Hvala prijateljima koji su pročitali i komentirali prvu verziju teksta ovog znanstveno-popularnog članka; ovaj je sufinanciran od strane Ministarstva znanosti obrazovanja i športa projektom BORA, 119-1193086-1311, te od Hrvatske zaklade za znanost projektom CATURBO, 09/ 151.

## Literatura

---

- [1] J. EGGER, *Thermally forced flows: theory. Atmospheric Processes Over Complex Terrain*, Urednik: W. Blumen. American Meteorological Society, 1990, 43–57.
- [2] B. GRISOGONO, J. OERLEMANS, *Katabatic flow: analytic solution for gradually varying eddy diffusivities*, *Journal of the Atmospheric Sciences*, **58**, 2001, 3349–3354.
- [3] I. KAVČIČ, B. GRISOGONO, *Katabatic flow with Coriolis effect and gradually varying eddy diffusivity*, *Boundary-Layer Meteorology*, **125**, 2007, 377–387.
- [4] L. MAHRT, *Momentum balance of gravity flows*, *Journal of the Atmospheric Sciences*, **39**, 1982, 2701–2711.
- [5] L. PRANDTL, *Führer durch die Strömungslehre*, Vieweg und Sohn, Braunschweig, 1942, 373–375.