

POSKUS SIMULIRANJA BURJE S POMOČJO NUMERIČNEGA MODELA

SIMULATION OF THE BORA WIND BY MEANS OF NUMERICAL MODEL

JeIko URBANČIČ
Hidrometeorološki zavod SRS, Ljubljana

UDK 551.555.4

SUMMARY

A two dimensional (X, Z) twinlayer model for studying the bora wind is described. It is used to simulate meteorological parameters, based on initial data for ground topography, the temperature difference and the height of the boundary between the two air layers, the pressure gradient in the upper or maritime air layer and the vertical temperature gradient in the lower or continental air layer.

Two groups of experiments were performed. First we made experiments using imaginary ground topography. Using different initial conditions, we found that bora intensity depends mainly on the temperature difference between the continental and maritime air layer, and on the pressure gradient in the boundary between them. The vertical temperature gradient in the lower layer is less important. The coefficient of friction and various conditions in the flat down-wind area have negligible influence on wind velocity.

In the second part we studied the agreement of model results with real conditions, and established that the simulation of the bora of 30. nov. 80. was in good agreement with surface observations.

POVZETEK

Za študij burje predstavljamo dvoplasten dvodimenzionalni (x, z) numerični model. Uporabljamo ga za izračunavanje meteoroloških parametrov, pri čemer nam služijo kot podatki: topografija tal, temperaturna razlika in višina meje med zračnima plastema, gradient pritiska v gornji oziroma morski zračni plasti ter temperaturna stratifikacija spodnje oziroma kontinentalne zračne plasti.

UVOD

Opravljenih je bilo že več raziskav burje. Paradiž (1957) jo je raziskoval v Slovenskem primorju, Makjanič (1978) v okolici Senja, Yoshino (1972, 1976) vzdolž celotne jadranske obale, Petkovšek (1976, 1982) pa je študiral tudi sunke burje in njihove periode. V okviru ALPEX programa je Smith (1982) objavil preliminarne rezultate merjenja burje s posebej opremljenim letalom. Kljub napredku merilne tehnike zelo močna sunkovitost in

velika časovna spremenljivost toka burje otežuje meritve vetra in zmanjšuje njihov pomen. Zelo velika hitrost vetra, ki v sunkih pogosto preseže 40 m/s, onemogoča merjenje vetrovnih profilov z radiosondami. Letalska merjenja pa so zaradi velike turbulence v toku možna le v zgornjih plasteh. Pričakujemo, da bomo pri študiju burje delno nadomestili to vrzel s pomočjo numeričnega modela.

Preprost model za študij burje je napravil že Arakawa (1976) podobne študije pa so naredili še Petkovšek (1968) ter kasneje Klemp in Lilly (1978). Za ta način študija burje smo se odločili tudi mi (1982, 1983).

Napravili smo dvodimenzionalni (x, z) model z realno topografijo in fino mrežo računskih točk. Z njim še ne bomo skušali ponazoriti sunkovitosti burje oziroma njene turbulence. Naš namen je dosežen že, če s stacionarnim modelom določimo karakteristično oziroma povprečno polje temperature in hitrosti vetra pri tem pojavu. Pričakujemo, da nam bo to omogočilo priti do nadaljnjih spoznanj iz dinamike burje.

PREGLED UPORABLJENIH OZNAK

ABS	absolutna vrednost
GMT	Greenwiški čas
K	difuzivnost
R	individualna plinska konstanta za zrak (= 287.04 m ² /s)
Ri	Richardsonovo število
T	temperatura
g	težnostni pospešek (= 9.81 m/s ²)
k _s	koeficient prizemnega trenja
l'	povprečna pot mešanja (v difuzijski enačbi)
p	pritisk
t	čas
u	horizontalna komponenta hitrosti
x	horizontalna koordinata
w	vertikalna komponenta hitrosti
z	vertikalna koordinata x, y, z sistema
α	naklonski kot (na primer topografije)
Δ	oznaka difference
ζ	vertikalna koordinata pomožnega sistema
θ	potencialna temperatura
ρ	gostota
φ(Ri)	stabilitetna funkcija (v difuzijski enačbi)
∂	operator parcialnega ali Eulerjevega diferenciranja

ENAČBE MODELA ZA SIMULIRANJE BURJE

Burja je seveda tridimenzionalni proces. Kljub temu vztrajamo pri modeliranju v dveh dimenzijah, ker bistvo zajamemo, in zaradi tega, ker bi sicer precej povečali delo računalka. Računamo torej le v vertikalni in v eni horizontalni dimenziji v smeri pretakanja zračne mase s kontinenta proti morju. Vplive iz druge, na to pravokotne, horizontalne smeri pa skušamo čim bolj parametizirati. Računamo torej v x, z ravnini.

Za popis stanja v atmosferi nam zadošča sistem šestih enačb. V modelu (Urbančič 1983)

smo jih uporabili v naslednji obliki:

Enačbo gibanja uporabimo za izračun horizontalnih hitrosti:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - K \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

Potencialno temperaturo opišemo z energijsko enačbo:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + w \frac{\partial \theta}{\partial z} + u \frac{\partial \theta}{\partial x} - K \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} = 0 \quad (2)$$

Vertikalne hitrosti vetra w zajamemo s kontinuitetno enačbo:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

Hidrostaticna enačba nam služi za povezavo pritiska p in višine:

$$\frac{\partial p}{\partial z} = - \rho g \quad (4)$$

Gostoto nadomeščamo s plinsko enačbo:

$$p = \rho RT \quad (5)$$

Difuzivnost K, ki jo potrebujemo v enačbi (1) in (2), izračunavamo z izrazom:

$$K = ABS \left(l'^2 \frac{\partial u}{\partial z} \right) / \varphi^2 (Ri) \quad (6)$$

kjer je l' povprečna pot mešanja, φ(Ri) pa eksperimentalno določena funkcija. Predpisali smo ji vrednosti med 1 in 2. Vrednost 1 ima v nevtralni temperaturni stratifikaciji pri logaritemskem profilu vetra, sicer pa v stabilni temperaturni stratifikaciji dovolimo maksimalno vrednost 2.

Pri zapisu enačb (1) – (6) smo predpostavili nestisljivost zraka in zanemarili horizontalno difuzijo.

Robne pogoje teh enačb smo definirali takole:

Talni robni pogoj predpisuje, da je vertikalna hitrost vetra enaka

$$w = u \cdot \operatorname{tg}(\alpha). \quad (7)$$

Trenje, zadnji člen v enačbi (1), izračunavamo pri tleh z izrazom

$$F \equiv K \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = -k_s \cdot u \quad (8)$$

kjer je k_s koeficient trenja in znaša v modelu med 0.004 s^{-1} in 0.04 s^{-1} .
Izmenjave toplote na površini ni.

Na zgornjem robu, to je na meji obeh zračnih plasti, smo predpostavili, da ni izmenjave mase in energije. Pritisk in hitrost vetra sta na določeni višini v zgornji plasti časovno konstantni količini in sta definirana z začetnimi pogoji.

Njuna vrednost na gornjem robu je torej odvisna tudi od njegove višine.

Bočni robni pogoji so definirani tako, da so vsi višji odvodi posameznih količin na robu enaki 0. Izjema je le levi ali privetrni rob, kjer je temperatura podana na začetku in se s časom ne spreminja.

NUMERIČNE METODE REŠEVANJA ENAČB

Območje, ki ga modeliramo, je v horizontalni smeri dolgo 78 km, v vertikalni smeri pa nekje med 1000 in 1500 m, odvisno od vremenske situacije. Predstavimo ga z mrežo, ki ima v horizontalni smeri 40 točk, v vertikalni pa 11. Računski nivoji so v horizontalni smeri ekvidistantni, v vertikalni pa neekvidistantni. V vsaki mrežni točki izračunavamo vse količine (p , T , u , w). Sistema enačb nato časovno integriramo z implicitno integracijsko shemo. Sekanju topografije in računskih nivojev se izognemo z vpeljavo ζ koordinatnega sistema. Pri tem kot vertikalno koordinato uporabimo funkcijo ζ :

$$\zeta = \frac{z - z_s}{z_t - z_s} \quad (9)$$

kjer je indeks s za tla in t za vrh plasti.

REZULTATI POSKUSOV Z MODELOM

Z opisanim modelom smo napravili več poskusov. Razdelimo jih v dve skupini: poskuse z predpostavljenimi začetnimi pogoji, s katerimi smo študirali naravo procesa, in poskuse, s katerimi smo študirali podobnost z dejansko situacijo.

V prvi skupini poskusov smo predpostavili idealiziran profil gorske pregrade. V modelu nastopata dve zračni plasti. Spodnja (kontinentalna) je hladnejša kot zgornja in se preliva prek gorske bariere in pri tem pridobi hitrost. Zgornja (morska) zračna masa je toplejša, z enakim temperaturnim gradientom kot spodnja in vpliva na dinamiko spodnje plasti.

Ti vplivi so matematično izraženi z robnimi pogoji. Višina meje med njima je s podatkom določena na levem (kontinentalnem) robu modeliranega območja. Sicer pa se spreminja in je na desnem (morskem) robu bistveno nižja kot na levem.

Kot primer teh poskusov navajamo rezultate ob naslednjih pogojih:

Višina meje obeh plasti na levem (kontinentalnem) robu modela: 1000 m (debelina spodnje plasti: 700 m)

Koeficient prizemnega trenja K_s : 0.004 s^{-1} .

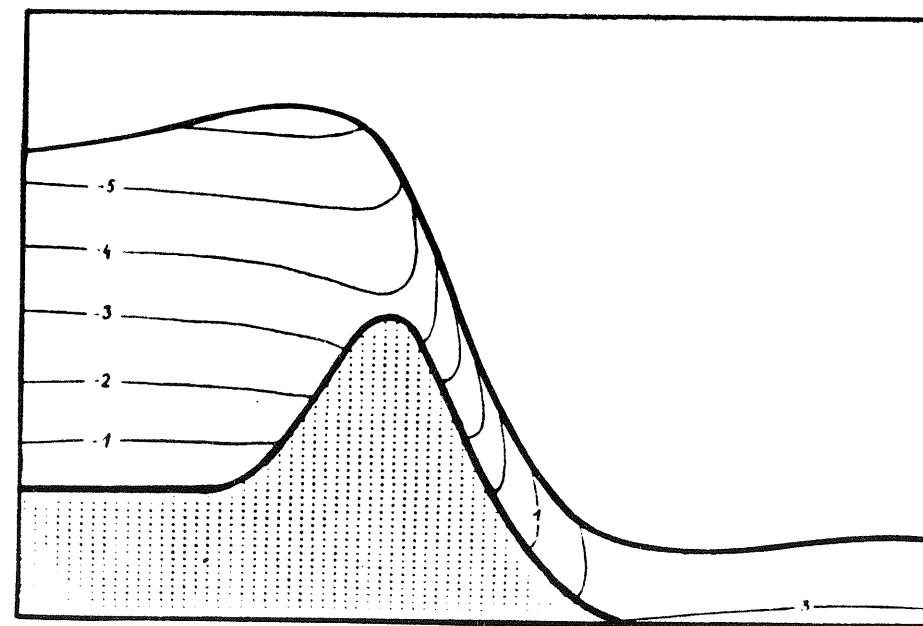
Gradient pritiska v smeri osi x na višini meje zračnih plasti (1000 m): $-0,5 \text{ mb}/100 \text{ km}$.

Temperaturna razlika med plastema: 5°C .

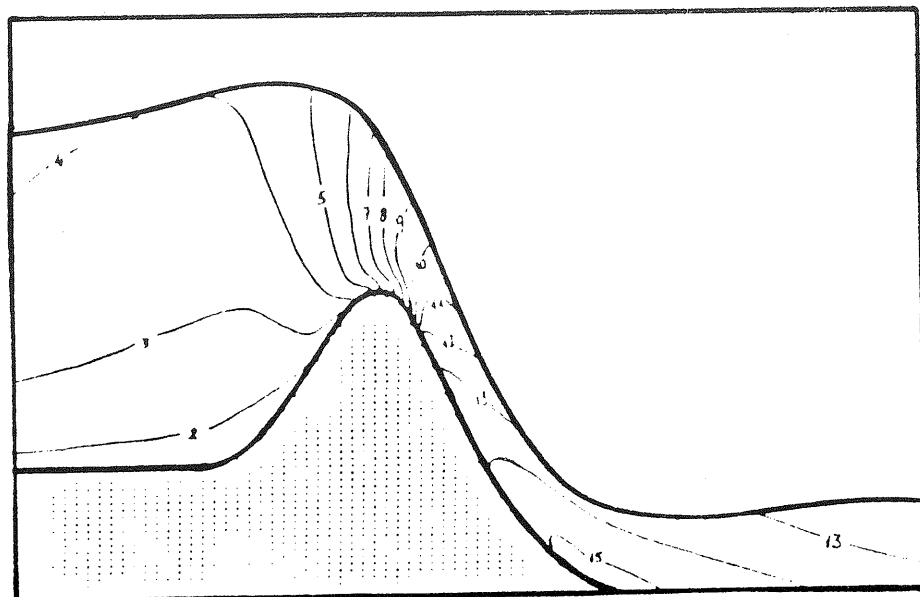
Vertikalni temperaturni gradient v spodnji plasti: $-0,71 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$.

Iščemo rezultate stacionarnega stanja modela, kateremu se dovolj dobro približamo po 16.000 sekundah modeliranega časa.

Sliki (1 in 2) predstavljata temperaturno in hitrostno polje, ki sta rezultat tega poskusa. Dobljena maksimalna hitrost pri tem poskusu je $15,6 \text{ m/s}$ ob vznožju gorske pregrade.



Slika1 Temperaturno polje [$^\circ\text{C}$]
Fig. 1 Temperature field [$^\circ\text{C}$]



Slika 2 Polje horizontalne hitrosti [m/s]

Fig. 2 Horizontal velocity field [m/s]

Primerjali smo rezultate različnih poskusov. Najbolj značilno vplivata na maksimalno hitrost vetra temperaturna razlika med obema zračnima masama in gradient pritiska, kar prikazujemo v tabeli (1).

Pri tem je v vseh primerih vertikalni temperaturni gradient $-0.71\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$; drugi pogoji, razen gradienta pritiska in razlike temperatur, pa so v vseh poskusih enaki.

Tabela 1 Maksimalne izračunane hitrosti [m/s] v odvisnosti od gradienta pritiska na višini meje zračnih plasti na privetnem robu modeliranega območja in od temperaturne razlike med zračnima masama

Table 1 Maximum computed velocity [m/s] as a function of the pressure gradient in the height of upwind upper boundary of lower layer and of the temperature difference between the two air masses.

$\partial p/\partial x$ / ΔT	0	3	5	($^{\circ}\text{C}$)
$-0.25\text{ mb}/100\text{ km}$	7.5	10.3	13.7	(m/s)
$-0.5\text{ mb}/100\text{ km}$	/	13.0	15.6	(m/s)

S poskusi z različnimi začetnimi pogoji (Urbančič 1983) smo ugotovili, da vpliva na jakost burje predvsem temperaturna razlika med kontinentalno in morsko zračno maso in velikost gradienta pritiska na njuni meji. Nekoliko manj je pomemben vertikalni temperaturni gradient v spodnji zračni plasti. Koeficient prizemnega trenja in razni pogoji na ravnem, zavetrnem delu modeliranega območja pa le malo vplivajo na hitrost vetra.

V drugem delu smo opravili poskus z realnimi podatki. Z njim želimo preveriti podobnost rezultatov modela z dejansko situacijo.

Obravnavali smo primer burje v okolici Ajdovščine 30. 11. 1980. Za relief smo uporabili profil terena med Vrhniko in Devinom, ki smo ga nekoliko zgladili. Uporabili smo meteorološke podatke od 30. 11. 1980 ob 12 GMT. Vertikalno temperaturno stratifikacijo, temperaturno razliko med obema zračnima masama in s tem tudi višino plasti modela (nad Vrhniko) smo določili ob pomočjo zagrebške radiosondažne meritve ob 12 GMT. Podatke o polju pritiska pa smo ocenili na podlagi 850 mb karte.

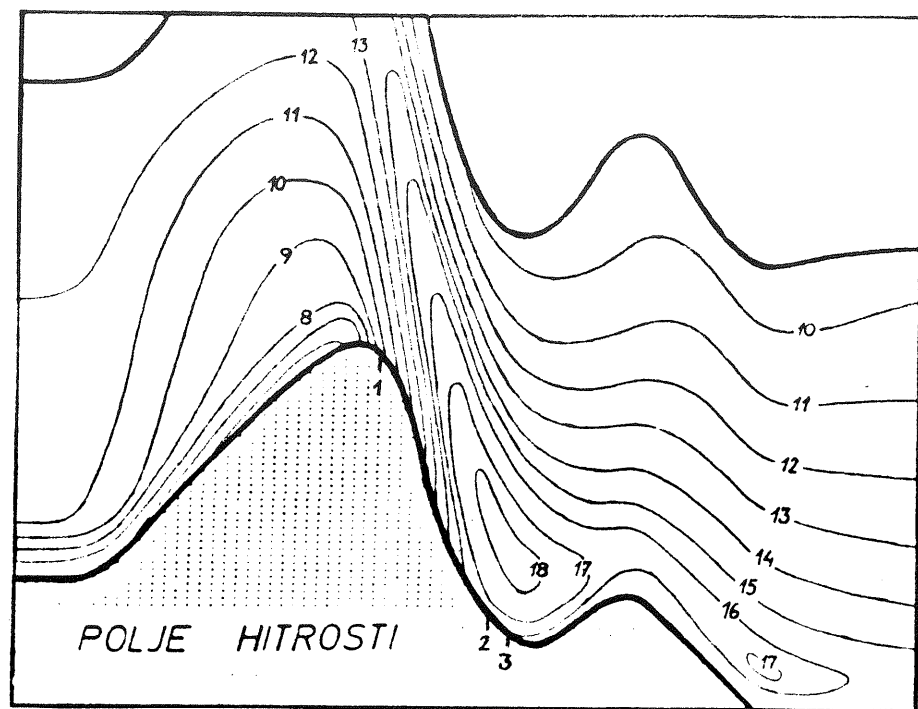
Torej so začetni podatki za poskus:

- višina zgornje meje plasti hladnega zraka na privetni strani je 1340 metrov;
- koeficient prizemnega trenja znaša $k_s = 0.004\text{ s}^{-1}$;
- gradient pritiska na višini 1340 m ima vrednost: $\partial p/\partial x = -0.5\text{ mb}/100\text{ km}$;
- temperaturna razlika med plastema znaša: $\Delta T = 5^{\circ}\text{C}$;
- vertikalni temperaturni gradient na privetni strani gorske pregrade ima do višine 765 m vrednost $-1^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$, nad to višino pa $-0.43^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$.

Maksimalna hitrost v polju se po modelu pojavi ravno nad položajem Ajdovščine na višini 174 m nad tlemi. Hitrost vetra je tam 18.4 m/s. (Slika 3).

Za primerjavo med rezultati modela in dejanskim stanjem imamo na razpolago povprečne urne podatke o hitrosti vetra v Ajdovščini, Dolgi poljani in na Strmcu. Primerjamo jih s hitrostmi vetra na prvem in drugem računskem nivoju in z oceno vetra na isti višini, kot je postavljen instrument. Izračunali smo jo po logaritemskem profilu vetra ($z_0 = 1\text{ cm}$) ob upoštevanju hitrosti zgolj na drugem računskem nivoju.

Primerjava nam, žal, lahko služi le kot prvi vtis o uspešnosti poskusa, saj je osupljiva zlasti relativno velika razlika med podatki iz Ajdovščine in Dolge poljane. Medsebojna oddaljenost med lokacijama je le 3 km, teren pa je precej homogen. Prvi vtis o podobnosti rezultatov modela z izmerjenimi vrednostmi je zelo dober. Na Strmcu se rezultati modela v vsakem primeru popolnoma ujemajo z opazovalnimi vrednostmi. V Dolgi poljani se nam z opazovanji popolnoma ujema le rezultat modela na prvem računskem nivoju. Po drugi metodi, to je z oceno z drugega računskega nivoja po logaritemskem profilu, dobimo za malenkost prevelike, čeprav še vedno zelo dobre rezultate. V Ajdovščini dobimo za dober meter v sekundi premajhne hitrosti, kar tudi pomeni dobro ujemanje z izmerjenimi podatki. Z meritvami pa se popolnoma ujemajo šele hitrosti na drugem računskem nivoju.



Slika 3 Polje horizontalne hitrosti [m/s] v poskusu modeliranja burje na Vipavskem 30. 11. 1980.
Ustrezni položaj prizemnih meritev v modelu:
1. Strmec,
2. Dolga poljana,
3. Ajdovščina.

Fig. 3 Wind velocity field [m/s] in modelling test of the bora wind of 30. 11. 1980 in the Vipava region.
Corresponding position of surface observations:
1. Strmec,
2. Dolga poljana,
3. Ajdovščina.

Tabela 2 Primerjava izmerjenih hitrosti vetra [m/s] z izračunanimi na treh točkah modeliranega območja

Table 2 Comparison of measured wind velocities [m/s] and computed ones at three points of the modelling area

		Strmec	Dolga poljana	Ajdovščina
Hitrost na prvem mrežnem nivoju	[m/s]	7,8	12,1	12,2
Hitrost na drugem mrežnem nivoju	[m/s]	11,4	17,8	17,9
Ocena na anemometriški višini po logaritmskem profilu ($Z_0 = 1$ cm)	[m/s]	8,0	13,1	15,6
Anemometerska višina	[m]	6 m	6 m	10 m
Interval treh izmerjenih povprečnih urnih hitrosti vetra	[m/s]	7,7–8,6	9,5–12,4	16,7–19,2

Ocenjujemo, da model dobro ponazarja obravnavani primer in da je primeren za študij burje. Kar se tiče neujemanja z izmerjenimi podatki, je očitno, da imajo ti precej večjo fluktuacijo kot ocena na podlagi računov.

ZAKLJUČEK

Delo posega na področje dinamike burje in nam daje pregled pomembnosti raznih faktorjev, ki vplivajo na hitrost burje. To je pomembno predvsem zato, ker kljub temu, da se z burjo ukvarja veliko avtorjev, njena dinamika ni tako dobro obdelana kot so drugi faktorji.

Prav tako je pomembna tudi sama izgradnja numeričnega modela. Z njo smo ugotovili, da je mogoče burjo dokaj dobro modelirati s takim tipom modela. Model je za študijske namene zelo dober in nudi široke možnosti uporabe, posegi vanj pa so precej preprosti. S tem smo dobili še eno metodo, ki jo lahko uporabljamo v prihodnjih raziskavah burje. Za operativno uporabo model v tej fazi ni primeren, ker je še vedno nekoliko počasen, ker še ni opravljena temeljita analiza z izmerjenimi podatki in ker na sedanji stopnji še ni možna kvantitativna prognoza parametrov, ki nam služijo kot podatki modela.

V tej fazi da model dobre stacionarne rezultate, ki ponazarjajo povprečne vrednosti hitrosti. Primeren je za študij raznih vplivov na stacionarno stanje modela. Tako bi poskusom o vplivu pritiskovega gradienta, temperaturnih razmer in koeficienta trenja na hitrost vetra lahko dodali še poskuse o vplivu drugih faktorjev, na primer reliefa in debeline spodnje zračne plasti.

LITERATURA

- Arakawa, S., 1976: Numerical Experiments on the Local Strong Winds: Bora and Föhn, v Local Wind Bora, University of Tokyo Press, 155–166
- Klemp, J.B., Lilly, D.K., 1978: Numerical Simulations of Hydrostatic Mountain Waves, J. Atm, Sci, Vol 35, No. 1, 78–107
- Makjanič, B., 1978: Bura, jugo, etezija, Savezni hidrometeorološki zavod, Beograd, 73 str.
- Paradiž, B., 1957: Burja v Sloveniji, v 10 let hidrometeorološke službe, Hidrometeorološki zavod SR Slovenije, Ljubljana, 147–172
- Petkovšek, Z., 1976: Periodičnost sunkov burje, Razprave – Papers, Vol. 20, št. 2, Ljubljana, 67–76
- Petkovšek, Z., 1982: Gravity Waves and Bora Gusts, 17th International Conference for Alpine Meteorology, Berchtesgaden, 108–110
- Smith, R., 1982: Areal Observations of the Yugoslavian Bora: Preliminary Results, Alpex Preliminary Scientific Results, GARP–ALPEX No. 7, Geneva, 187–200
- Urbančič, J., 1982: Numerical Experiments on Bora Wind, 17th International Conference for Alpine Meteorology, Berchtesgaden, 119–121
- Urbančič, J., 1983: Študij burje s pomočjo numeričnega modela, Magistrsko delo, Univerza Edvarda Kardelja VDO FNT, VTOZD Fizika, 71 str.
- Yoshino, M., 1972: An Annotated Bibliography on Bora, Climatological Notes 10, Department of Geography, Hosei University, Tokyo, 1–22
- Yoshino, M., 1976: Local Wind Bora, University of Tokyo Press, 289 str.