

**MODEL ZA OCENO OROGRAFSKEGA DODATKA K VERJETNI
NAJVEČJI KOLIČINI PADAVIN**

**MODEL FOR ESTIMATION OF OROGRAPHIC PART OF THE
MAXIMAL POSSIBLE PRECIPITATION**

Tomaž VRHOVEC
Hidrometeorološki zavod SRS, Ljubljana

UDK 551.577.51

SUMMARY

The physical basis of a model for the estimation of the orographic addition to the maximal possible precipitation is described. The model is two-dimensional, steady state, and the total amounts of water vapour and energy are conserved within the model space. The system of partial differential equations that describe the thermo- and hydrodynamics of the atmosphere is linearized and used for calculation of the vertical stratifications of the temperature, the dew point temperature, the mixing ratio of water vapour and of the components of the wind velocity. The liquid water mass flux density is calculated and the spectral distribution of rain drops or snow crystals is determined at each grid point. The grid net is equidistant along the horizontal axis, while the vertical differences among the layers is determined according to the profile of the topography. The trajectories for all classes of raindrop spectra and all the grid points are calculated and thus a distribution of liquid water mass flux density is determined at the ground. Some empirical parameters of the model are evaluated from some examples of intensive precipitation.

POVZETEK

Predstavljene so fizikalne osnove modela za oceno orografskega dodatka h količini padavin. Namenjen za določitev orografskega dela verjetnih največjih padavin. Model je dvo-dimenzionalen, stanje je stacionarno, območje modela z okolico ne izmenjuje energije in vodne pare. Sistem parcialnih enačb, ki popisujejo stanje v atmosferi, je lineariziran in tak uporabljen za numerično računanje razporeditev temperature, temperature rosišča, specifične vlage in komponent vektorja hitrosti. Izračunana je količina izločene vode, po ustrezni parametrizaciji spektra padavinskih elementov in po upoštevanju dodatnega zlivanja kapljic, pa so izračunane trajektorije padanja padavinskih elementov; s tem je določena razporeditev količine padavin vzdolž reliefa. Spremenljivi parametri modela so umerjeni po opazovani padavinski situaciji.

UVOD

Verjetna največja količina padavin je definirana (WMO 1973) kot tista največja količina padavin, ki lahko pade na dano področje v določenem letnem času, da je še fizikalno mogoča. Postopek za določanje verjetne največje količine padavin je odvisen od tega, za kakšno področje računamo to oceno. Predvsem sta različna postopka za določanje ocene za VNP nad ravnino in nad goratim področjem. Nad ravnino računamo VNP na podlagi predpostavke, da je zrak nestisljiv, in tako velja poenostavljena kontinuitetna enačba v p sistemu:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial \omega}{\partial p} \quad (1)$$

Z integracijo te enačbe po pritisku dobimo vertikalno hitrost ω , z njo pa določimo količino padavin:

$$RR = \frac{1}{q} \int_{p_1}^{p_2} \omega \frac{\partial l}{\partial p} dp \quad (2)$$

kjer so:

- q specifična vlaga
- RR gostota masnega toka tekoče vode
- p pritisk

Račun bi bil tako kaj preprost, če bi imeli na voljo podatke o vertikalni razporeditvi horizontalne divergencije hitrosti in specifične vlage. Za izračun VNP bi seveda izbrali maksimalne verjetne podatke. Ker pa je divergenca težko natančno merljiva in podatki o tem ponavadi niso na voljo, je treba v skladu z navodili WMO iz podatkov o opazovanih primerih velikih padavin in ob tem izmerjenih vetrovih najprej izračunati oceno za divergenco in šele nato izračunati količino padavin. Za gorato območje je postopek bolj zapleten. Vertikalnih hitrosti ne moremo računati zgolj iz kontinuitetne enačbe (1), saj pride zaradi reliefa do dodatnih vertikalnih premikov zraka. Ta vertikalna hitrost w v z sistemu se zapiše:

$$w = \vec{u} \cdot \nabla h \quad (3)$$

kjer h popisuje nadmorsko višino tal.

Pri določanju ocene za VNP postavimo, da sta prispevka k vertikalni hitrosti, prvi zaradi divergencije, drugi zaradi orografije, ločljiva, tako da konvergenčni del računamo tako kot nad ravnino, upoštevaje seveda, da je spodnja meja intervala integracije v (2) manjša, kot bi bila nad ravnino. Za orografski dodatek pa moramo narediti primeren model. Spremenljive parametre modela umerimo na opazovanem primeru velikih padavin. V nadaljevanju so predstavljene fizikalne osnove, numerični postopki in uporabnost modela za določitev orografskega dodatka k verjetni največji količini padavin. Ta članek je povzetek diplomskega dela z enakim naslovom, obranjenega na Fakulteti za naravoslovje in tehnologijo, VTOZD Fizika, na Katedri za meteorologijo, v decembru 1982.

FIZIKALNE OSNOVE MODELA

Zrak z znano vertikalno razporeditvijo temperature, vlage in hitrosti priteče do gorske pregrade. Če postavimo, da zrak pregrade ne obteče, se ob njej začne dvigati, se ohlajati, in ko se ohladi pod temperaturo rosišča, se začne izločati voda — nastane oblak. Če se je pri dviganju zrak labiliziral, se dviganje še stopnjuje. Če zrak kar naprej priteka in se pri tem zaradi neobtekanja pregrade dviga, se oblak gosti, dokler ne začne voda iz oblaka izpadati. V doseženem stacionarnem stanju iz oblaka izpade vsa voda, kar se je v pritekajočem in dvigajočem se zraku kondenzira, saj je model namenjen računu verjetnih največjih padavin. Voda iz oblaka izpada v tekočem oziroma v trdnem stanju, odvisno pač od okolišnih temperatur; padavinski elementi pa ne padejo na tla pod mestom nastanka, pač pa jih veter nosi s seboj. Če predpostavimo, da padavinski elementi pri padanju ne izhlapevajo in tako ne vplivajo na razmere na zavetrni strani pregrade, potem lahko celoten proces razdelimo v dva dela:

— dvig in kondenzacija

— padanje padavinskih elementov.

Poleg že omenjenih smo upoštevali še naslednje predpostavke:

— koordinatni sistem orientiramo z osjo X pravokotno na smer dolgega grebena, os Z pa kaže v zenit;

— koordinatni sistem je dvodimenzionalen;

— med sistemoma (x, p) in (x, z) velja hidrostatična povezava;

— morebitne spremembe realnega reliefa v smeri Y upoštevamo z izgladitvijo reliefa;

— tok je laminaren, trenja ni, morebitno turbulenco v kotlinah upoštevamo z izgajevanjem reliefa v smeri X;

— tok je navzgor omejen z ravno tropopavzo, ki preprečuje vertikalna gibanja, pri tleh pa sledi reliefu;

— tok je stacionaren.

Trajektorije toka zraka določimo na podlagi predpostavk o omejenosti, laminarnosti in stacionarnosti tako, da zahtevamo, da zrak pri tleh sledi reliefu, z višino pa se to sledenje zmanjšuje, tako da je na tropopavzi tok horizontalen. Takšno sicer zgolj geometrijsko določanje trajektorij se svoji grobosti navkljub dobro ujema z rezultati bolj natančnih izračunov (Eliassen 1972, Tibaldi 1972).

Za del zraka, ki se premika po tako določeni trajektoriji, lahko izračunamo z upoštevanjem stanja, v katerem se del zraka nahaja pred premikom, kakšne bodo spremembe temperature rosišča in vlage. V ta namen uporabimo enačbe suhoadiabatnega dviga, dokler zrak še ni nasičen oziroma enačbe za mokroadiabatni dvig za področja nad kondenzacijskim nivojem.

Spreminjanje vertikalne razporeditve horizontalne hitrosti lahko izračunamo iz integrirane oblike kontinuitetne enačbe (integriramo po volumskem elementu vzdolž trajektorije) in dobimo enačbo

$$u \frac{\partial \Delta p}{\partial x} + \Delta p \frac{\partial u}{\partial x} = 0, \quad (4)$$

kjer je Δ presek tokovne cevi v p koordinati. Vertikalno komponento hitrosti izračunamo iz horizontalne in iz nagiba ploskve Z, ki omejuje tokovno cev.

$$w = \frac{\partial z}{\partial x} \quad (5)$$

Količino vode, ki se izloči v oblaku v stacionarnem stanju prav tako določimo z volumno integracijo kontinuitetne enačbe za specifično vlago. Iz enačbe

$$\Phi_m = - \int \rho q \vec{u} d\vec{S},$$

kjer je Φ_m masni tok in \vec{S} vektor ploskev, tako dobimo

$$P = \frac{1}{\rho} u \Delta p \frac{\partial q}{\partial x}, \quad (6)$$

kjer je P gostota masnega toka tekoče vode, ki izpade iz volumnskega elementa. V enačbi (6) nastopajoče polje l lahko izračunamo iz poprej izračunanih podatkov o temperaturi in temperaturi rosišča.

Na tem mestu privzamemo, da poznamo polja T, Td, u, w, in P. Razporeditev količine padavin po tleh dobimo potem, ko voda iz oblaka izpade in doseže tla. Ker je stanje stacionarno, torej je časovni odvod vodnosti oblaka enak nič, mora iz oblaka izpasti vsa iz pritekajočega in dvigajočega se zraka izločena voda. Ker pa smo predpostavili, da kapljice/kristali ne izhlapevajo, mora vsa izločena voda tudi pasti na tla. Voda se v oblaku izloča v obliki kapljic oziroma snežnih kristalov, odvisno pač od temperaturnih in vlažnostnih razmer. Nastali padavinski elementi niso vsi enake velikosti, tako da so njihove hitrosti padanja različne. V resnici se razporeditev kapljic/kristalov po radijih — to je spekter padavinskih elementov — ves čas padanja kapljic spreminja zaradi interakcij med kapljicami samimi in med njimi in kristali, vendar so modeli, ki popisujejo to dogajanje v oblaku preobsežni, da bi jih mogli vključiti v okvir tega dela. Zato smo ves problem spektra padavinskih elementov parametrizirali, upoštevaje Marshall-Palmerjevo hipotezo z nekaterimi dopolnitvami (Marshall, Palmer 1948, Blanchard 1970, Srivastava 1978). Masni spekter zapišemo:

$$AP(r, r + \Delta r) = P \lambda^4 / 6 \int_r^{r+\Delta r} r^3 \exp(-\lambda r) dr, \quad (7)$$

kjer so:

- λ — parameter razporeditve
- r — radij padavinskega elementa
- Δr — dolžina razreda po radijih.

Parameter razporeditve λ je odvisen od količine padavin. Marshall in Palmer (1948) sta za količine padavin manjše od 25 kg/m² h dobila za λ takšne empirične enačbe:

$$\lambda = 45,77 \text{ mm}^{-1} (\text{RP})^{0,21} \quad \text{RP} = \frac{\text{RR}}{\text{RR}_0} \quad \text{RR}_0 = 1 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$$

in za sneg

$$\lambda = 0,11 \text{ mm}^{-1} (\text{RP})^{-0,45}$$

Za večje količine padavin smo privzeli, da je $\lambda = 4 \text{ mm}$ (Mason 1971, Blanchard 1970). Količino padavin, ki določa vrednost λ , smo v modelu izračunali tako, kot da v atmosferi ni horizontalnih gibanj in tako vsa voda pade naravnost navzdol, tako da je RR pravzaprav le integral enačbe (7).

Trajektorije padavinskih elementov so popisane z dvema enačbama:

$$\frac{dz}{dt} = w(x, z) - v_z \quad (8)$$

$$\frac{dx}{dt} = u(x, z)$$

Hitrost padanja padavinskih elementov v mirnem zraku v_z je odvisna od radija in vrste padavinskega elementa, spekter hitrosti vzorčimo po enakih razredih kot masni spekter. (Gunn, Kinzer 1949, Mason 1971).

Če bi bilo gibanje vseh kapljic zgolj vertikalno, bi bil ves vpliv interakcij med padavinskimi elementi popisan že s spektrom. Ker pa se zaradi horizontalne komponente polja hitrosti premikajo kapljice tudi horizontalno in pri tem prihaja do dodatnih interakcij, hkrati pa so seveda v zraku tudi kapljice, ki niso nastale zaradi prisilnega dviga ob gorski pregradi, pač pa zaradi vsesplošnega dviga zraka, je potrebno hitrosti v_z primerno popraviti. Upoštevati moramo, da zaradi dodatnih vplivov kapljice padajo nekoliko hitreje, kot bi to pričakovali pri povsem vertikalnem padanju. Vertikalne hitrosti kapljic korigiramo tako, da je oblika razporeditve količine padavin čimbolj podobna izmerjeni.

Omenili smo že, da padavinski elementi lahko nastanejo kot kapljice ali pa kot snežni kristali. V modelu smo predpostavili, da slednji nastanejo le, če je temperatura na mestu nastanka manjša kot 253K, stopijo pa se, ko temperatura preseže 273K. Zavoljo enostavnosti računa predpostavimo, da se določen razred snežnih kristalov pretvori v natančno en razred deževnih kapljic, masa razreda ostane torej enaka, po staljenju se spremeni le hitrost padanja v_z .

Ko zrak, iz katerega se je izločila vsa voda, pride prek vrha pregrade, se začne spuščati in s tem ogrevati. Spuščanje poteka po enačbi za suho adiabato, saj smo predpostavili, da iz zraka izpade vsa kondenzirana voda, in tako v zraku ni kapljic, ki bi s svojim izhlapevanjem vzdrževale nasičeno stanje.

NUMERIČNI POSTOPKI

Enačbe, izpeljane v prejšnjem razdelku, smo izrazili s končnimi diferencami in take uporabili pri izdelavi algoritma, ki je služil za osnovo pascalskega programa ENA, narejenega tako, da se more prilagoditi poljubnim reliefnim in razsežnostnim razmeram. Prav tako je spremenljivo tudi število računskih nivojev ter dolžine in število horizontalnih enot.

Področje računa je v vertikalni smeri navzgor omejeno s horizontalno tropopavzo pri pritisku 200 mb, navzdol pa z reliefom, popisanim z nadmorsko višino. V horizontalni smeri so razsežnosti modela pogojene s klimatskimi in reliefnimi razmerami. Za zahodno Slovenijo, kjer pade večina orografskih padavin ob jugozahodniku, je prerez reliefa v tej smeri dolg nekako sto kilometrov. Zaradi omejenega računalniškega prostora smo si horizontalno enoto izbrali dolgo dva kilometra, tako da smo imeli v smeri X 50 računskih odsekov. V vertikalni smeri smo računali na 16 nivojih, tako da smo vsega skupaj imeli 800 računskih točk. Nivoji so razporejeni tako, da razdelijo atmosfero med tlemi in tropopavzo v 16 plasti, ki potekajo prav tako kot geometrijsko določene trajektorije zraka. Vzdolž vsakega vertikalnega preseka so plasti, merjeno v pritiskovi kooordinati, enako debele.

Vhodni podatki so sestavljeni iz dveh delov:

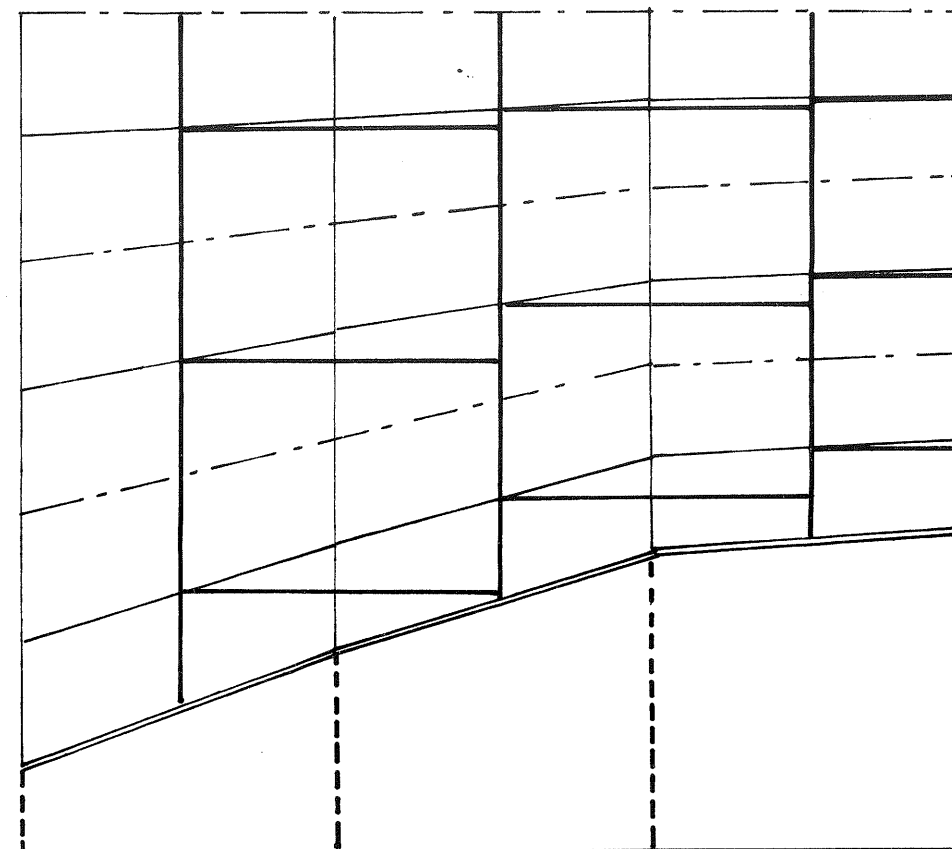
- podatki o vertikalni razporeditvi temperature, temperature rosišča in projekciji horizontalne komponente vektorja hitrosti na smer prereza reliefa pri poljubno izbranih pritiskih,
- podatki o nadmorski višini reliefa in o temperaturi zraka pri tleh.

Vertikalni podatki so pripravljani na podlagi radiosondaže s postaje Udine (Videm), horizontalni pa na podlagi topografskih kart in meritev temperature na klimatskih postajah vzdolž preseka. Izgladitev reliefa je bila opravljena ročno.

Del računskega področja z vrisanim potekom računskih nivojev

- tokovnih cevi in s prirejenim koordinatnim sistemom prikazuje slika 1.

Obdelavo smo izvedli z računalnikom Univerzitetnega računskega centra DEC 10.



Slika 1 Potek računskih nivojev: - - - nadmorska višina, - . - . - meje tokovnih cevi, ————— površje, ————— računski nivo v koordinati p, ————— stopničasti koordinatni sistem v koordinati z, (T, T_d, u in v poznamo v sečiščih tankih črt, voda se izloči na sečiščih debelih črt, slednje točke so začetki trajektorij)

Fig. 1 Schematic representation of grid net. - - - altitudes, - . - . - the boundaries between the flow layers, ————— the surface, ————— the niveau of calculation in p system, ————— the niveau of calculation in z system, (T, T_d, u and v are calculated in the points where thin lines cross, the trajectories start in the points, where dick lines cross.

RAZPOREDITVE KOLIČINE PADAVIN VZDOLŽ RELIEFA

Model smo preiskovali na primeru izdatnih padavin v zahodni Sloveniji 13. in 14. 10. 1983. Poleg vhodnih podatkov smo imeli na voljo še podatke o količini padavin, ki je ob tej padavinski situaciji padla vzdolž izbranega preseka.

Sintopična vremenska situacija 14. 10. ob 00.00 GMT kaže, da je bilo nad pretežnim delom Evrope območje nizkega zračnega pritiska. V višinah so nad severnim Sredozemljem in Alpami pihali jugozahodni vetrovi. Hladna fronta je stacionirala južno od Alp, ponoči se je izoblikoval v Genovskem zalivu kratkotrajen sekundarni ciklon. Na vsem obravnavanem območju je bilo oblačno, padavine so se začele 13. 10. popoldne, v Novi Gorici ob 17.30, na Knežkih Ravnah ob 18.00, v Bohinju pa okoli 19.00.

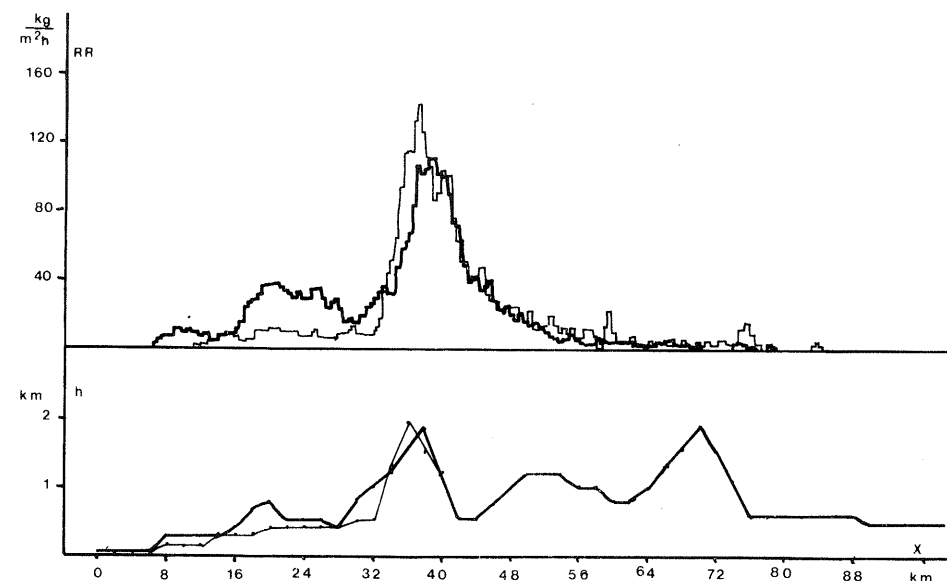
Vzdolž smeri JZ–SV smo v zahodni Sloveniji pripravili štiri preseke reliefa. Podatke o temperaturi 13. 10. ob 21.00 samo z interpolacijo prilagodili in jih uporabili vzdolž preseka. Za vse preseke smo s programom ENA izračunali razporeditev pritiska, temperature, temperature rosišča, specifične vlage, horizontalne in vertikalne komponente vektorja hitrosti in polje gostote masnega toka izločene vode. Za vse točke, kjer se je izločila voda, smo izračunali trajektorije padavinskih elementov ter tako določili razporeditev količine padavin pri tleh. S preiskovanjem različnih korekcijskih faktorjev smo skušali doseči čim boljše ujemanje oblike izračunane razporeditve količine padavin z obliko izmerjene. Pri razporeditvah količine padavin, predstavljenih na slikah 2 in 3 je vrednost korekcijskega faktorja 2, če je gostota masnega toka večja od $0.0005 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ in hkrati izračunani oblak dovolj visok, na sliki 4 pa je korekcijski faktor enak 1.5. Za točke, ki ne izpolnjujejo pravkar omenjenih kriterijev, je korekcijski faktor enak 1 in je spekter hitrosti tako nespremenjen.

Pri komentiranju rezultatov modela moramo upoštevati, da smo z modelom računali le orografski dodatek h količini padavin in da smo predpostavili, da vsa izločena voda iz zraka tudi izpade, saj je bil naš namen narediti model za računanje verjetnih največjih padavin. Izračunane vrednosti presegajo izmerjene, presežek je posebno očiten v bližini prve, glavne pregrade. (Prva, glavna pregrada ustreza Bohinjskemu grebenu). Za drugo pregrado (ta ustreza Karavankam) dobimo v vseh primerih bistveno manj padavin kot pa za prvo. Razloga za takšen rezultat, ki se ne ujema z opazovanim stanjem, sta dva: v modelu smo predpostavili, da vsa izločena voda tudi izpade, ob tem dobi prva pregrada veliko padavin; do druge pa pride zrak že precej suh, saj smo hkrati predpostavili, da je model dvodimenzionalen, in tako nismo upoštevali nikakršnih bočnih transportov vlage.

Pokazal se je zanimiv vpliv predgorja pred prvo pregrado:

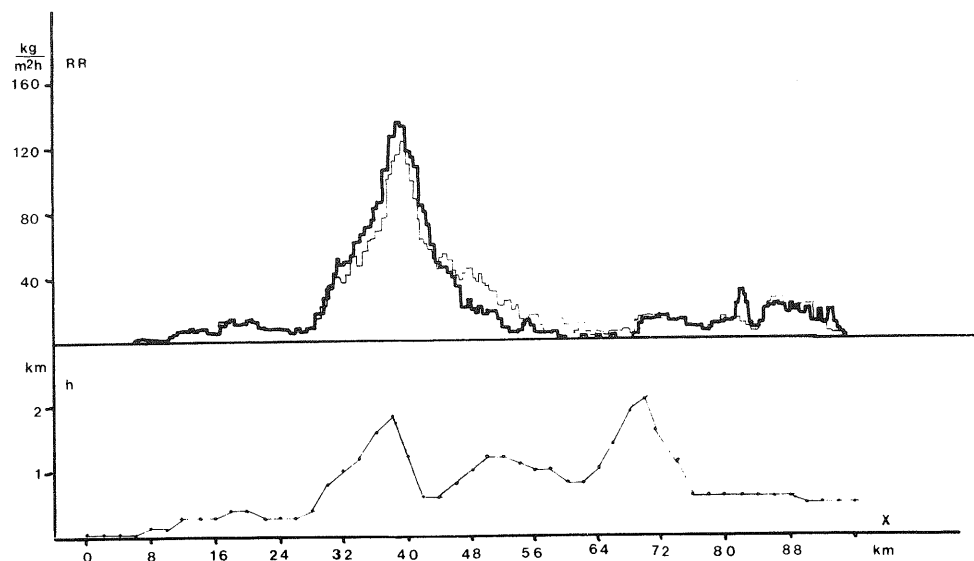
Za preseke z izrazitim predgorjem (predgorje ustreza planotama Trnovski gozd in Banjščica) je značilno, da dobi prva pregrada tretjino manj padavin kot pa preseki z nizkim predgorjem, četudi je višina prve, glavne pregrade povsod enaka. Razporeditev količine padavin okoli prve pregrade ustreza pričakovanjem, maksimum razporeditve je vedno na zavetrni strani pregrade, vendar je tudi na privetrni strani grebena precej padavin. Vzdolž privetrne strani grebena količina padavin narašča, naraščanje je tem izrazitejše, čim strmije je pobočje. Strmim pobočjem ustrezajo izraziti maksimumi. Če je druga pregrada

nižja od prve, potem se ob njej ne izloči nič vode; količina padavin, ki jo zaznamo okoli vrha te pregrade je posledica geometrije padanja najmanjših kapljic, nastalih nad prvo pregrado. Če je druga pregrada višja od prve, se ob njej sicer izloči nekaj vode, predvsem na višjih nivojih, vendar so praviloma gostote teh masnih tokov majhne. Razporeditev količine padavin za drugo pregrado ne ustreza opazovani, saj so izmerjene količine večje od izračunanih, pa tudi sekundarni maksimumi, ki se pojavijo v zavetrju druge pregrade, so nerealni. Zrak, ki se spušča z druge pregrade, je že tako topel in suh, da bi morebitni padavinski elementi, nastali nad drugo pregrado, v njem zanesljivo izhlapeli.



Slika 2 Zgornji del slike predstavlja razporeditev gostote masnega toka tekoče vode (intenziteta padavin), spodnji pa nadmorske višine reliefa. Vertikalna dimenzija reliefa je povečana osemkrat. Korekcijski faktor za tanki graf je 1.5, za debeli 2.

Fig. 2 Results of the model: the upper part of the figure represents the distribution of liquid water mass flux density, the lower part is topography. The elevations are 8 times exaggerated. The correction factor for the thin graph is 1.5, for the thick graph is 2.



Slika 3 Zgornji del slike predstavlja razporeditev gostote masnega toka tekoče vode (intenziteta padavin), spodnji pa nadmorske višine reliefa. Vertikalna dimenzija reliefa je povečana osemkrat. Korekcijski faktor je 1,5. Tanki graf ustreza reliefu z manj, debeli pa reliefu z bolj izrazitim predgorjem.

Fig. 3 Results of the model: the upper part of the figure represents the distribution of liquid water mass flu density, the lower part is topography. The elevations are 8 times exaggerated. The correction factor is 1,5. The thin graph corresponds to the topography with lower mountains before the main barrier.

LITERATURA

- Gunn R., Kinzer G.D., 1949: The terminal velocity of fall for water drops in stagnant air, *J. Meteor.*, vol 6, 243–248
- Mason J., 1971: *The Physics of the clouds*, Cladderon press, Oxford, 671 str.
- Blanchard D. C., Spencer A. T., 1970: Experiments on generation of raindrop size distribution of drop breakup, *J. Atmos. Sci.*, vol 27, 101–108
- Eliassen E., 1972: Airflow over mountains, Summer school on mesoscale atmospherical phenomena, Venecia, CNR Italia
- WMO, 1973: Manual for estimation of probable maximum precipitation, No 332
- Tebaldi B., 1973: Stratified flow over topography, Summer school on mesoscale atmospherical phenomena, Venecia, CNR Italia
- Srivatsava R.C. 1978: Parametrization of raindrop size distribution, *J. Atmos. Sci.*, vol 53 108–117